

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DES PÂTES ET PAPIERS

PAR  
ÉLYSA RAMINOSOA

DÉVELOPPEMENT DES DIVERSES FRACTIONS DE FIBRES LORS DU  
RAFFINAGE

MAI 2007

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## Remerciements

Je voudrais d'abord exprimer mes sincères remerciements du fond de mon cœur à mon directeur, le professeur Robert Lanouette, pour sa direction, ses conseils judicieux, et sa patience à toute épreuve.

Ce travail a été rendu possible grâce au support financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada.

Je tiens aussi à remercier monsieur Alain Marchand et monsieur Pierre Gendron pour leur collaboration et leur aide. Mes sincères remerciements s'adressent aussi aux étudiants qui ont participé à ce projet : Fang Huang, Quanqing Zha, Guillaume Magnan, Alexandre Ferluc et Sabrina Ouellet.

Je tiens également à remercier tout le personnel du Centre Intégré en Pâtes et Papiers de l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour leur aimable collaboration.

Finalement, j'adresse particulièrement ma sincère reconnaissance à mon mari pour le soutien moral et affectif tout au long de mes études.

## Résumé

L'industrie de pâtes et papiers est encore très dépendante des ressources forestières. Ces ressources représentent près de 78% du total de fibres papetières utilisées au Canada. Le groupe des espèces forestières le plus utilisé est celui des conifères, qui représentent les trois quarts du volume de la récolte.

Depuis des années, les usines de pâtes et papiers du Québec utilisent beaucoup plus de résineux traditionnels, tels que l'épinette noire et le sapin, que de feuillus pour produire des pâtes mécaniques, en raison du fait qu'elles sont facilement utilisables pour produire des pâtes mécaniques. Toutefois, au cours de la dernière décennie, la diminution de la disponibilité des espèces traditionnelles dans l'industrie papetière, comme l'épinette noire et le sapin, ainsi que la nécessité d'utiliser d'autres espèces ont commencé à contraindre l'utilisation du pin gris dans les usines de pâtes et papiers. L'industrie de pâtes et papiers se voit donc forcée d'utiliser des quantités de plus en plus importantes de pin gris. Il est donc probable que le pin gris devienne une source d'approvisionnement de plus en plus utilisée dans les usines de pâtes et papiers dans l'avenir. Cependant, l'utilisation du pin gris pour la fabrication de pâte à papier demeure très faible. Il possède un pourcentage de bois d'été plus élevé et une paroi cellulaire plus épaisse de ce bois. Sa haute teneur en matières extractibles cause des problèmes de poix sur les machines à papier, ce qui entraîne des problèmes de formation et des casses plus fréquentes. De plus, le pin gris nécessite de 25 à 50% plus d'énergie de raffinage que l'épinette noire pour arriver à un indice d'égouttage donné, malgré le fait que le développement des propriétés de liaison demeure moindre. Cela nous mène à investiguer le développement des diverses fractions de fibres de pin gris lors du raffinage pour avoir une bonne qualité de la feuille et ainsi augmenter son utilisation dans le domaine papetier.

Nous avons effectué des essais de raffinage à 100 °C, 120°C, 140°C et 160 en un, deux et trois stades de raffinage, en nous concentrant sur l'étude de la morphologie des fibres et sur les propriétés des papiers produits en fonction de la variation de la température et du nombre de stade.

Les résultats montrent qu'en augmentant le nombre de stades, la consommation d'énergie est plus élevée, l'intensité diminue, le taux de rejets diminue, la surface spécifique des fines augmente, les fibres moyennes/courtes ainsi que les fibres longues sont mieux développées et la résistance du papier augmente pour un même CSF. L'augmentation du nombre de stades a peu d'impact sur les propriétés optiques (blancheur, opacité, coefficient de la lumière) du papier pour un même CSF.

Les résultats montrent qu'en augmentant la température, la consommation d'énergie augmente, on voit peu d'impact sur l'intensité, le taux de rejets diminue, la surface spécifique des fines augmente, les fibres moyennes/courtes sont peu influencées, les fibres longues sont plus fibrillées, la résistance du papier augmente et les propriétés optiques du papier (blancheur, opacité, coefficient de diffusion de la lumière) diminuent pour un même CSF. Il serait possible de contrôler la perte de blancheur en réduisant le temps à haute température.

Les résultats nous permettent de conclure que le raffinage à haute température (160°C) au premier stade jusqu'à un CSF de 350 mL, suivi d'un raffinage de haute ou à basse température en deuxième stade atmosphérique jusqu'au CSF désiré semble préférable pour obtenir une énergie acceptable, d'excellentes propriétés de toutes les fractions et une augmentation globale des propriétés finales du papier, pour permettre ainsi une augmentation du taux d'utilisation du pin gris dans le domaine papetier.

### **Mots Clés :**

*Pinus banksiana*, mise en pâte thermomécanique, morphologie des fibres, propriétés optique et physique.

## Table des Matières

Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
Mots Clés :.....	iv
Table des Matières .....	v
Liste des Figures.....	viii
Liste des Tableaux.....	ix
Liste des Abréviations.....	x
Liste des équations .....	xi
Chapitre 1 - Introduction.....	1
1.1    Problématique .....	1
1.2    Objectif .....	2
Chapitre 2 - Mise en pâte à haut rendement.....	4
2.1    Procédés de mise en pâte mécanique .....	4
2.1.1    Pâte thermomécanique (PTM).....	6
2.1.2    Pâte mécanique de raffineur (PMR) .....	8
2.2    Facteur influençant la qualité de la pâte.....	9
2.2.1    Essence de bois .....	9
2.2.2    Énergie spécifique.....	10
2.2.3    Intensité de raffinage.....	11
Chapitre 3 - Le pin gris .....	15
3.1    Le pin gris comme matière première .....	15
3.2    Caractéristiques du pin gris.....	16
3.2.1    Morphologie .....	16

3.2.2	Caractéristiques physiques.....	17
3.2.3	Caractéristiques chimiques .....	18
3.3	Le pin gris dans l'industrie des pâtes et papiers.....	19
3.3.1	Pâtes PTM de pin gris.....	19
3.3.2	Pâte chimiothermomécanique (PCTM) .....	21
3.3.3	Pâte chimico- mécanique (PCM).....	22
Chapitre 4 - Méthodologie .....		24
4.1	Description de la matière première .....	24
4.2	Méthode de raffinage .....	24
4.3	Évaluation des pâtes.....	25
Chapitre 5 - Résultats et Discussions .....		27
5.1	Propriétés de la pâte .....	27
5.1.1	Intensité de raffinage.....	27
5.1.2	Consommation d'énergie spécifique .....	29
5.1.3	Taux de rejets.....	30
5.1.4	Longueur moyenne des fibres .....	32
5.1.5	Études des caractéristiques des fractions .....	33
5.1.5.1	Fines .....	33
5.1.5.2	Fibres courtes et moyennes .....	35
5.1.5.3	Fibres longues .....	36
5.2	Propriétés du papier .....	40
5.2.1	Propriétés physiques du papier .....	40
5.2.1.1	Bouffant.....	40
5.2.1.2	Indice de rupture.....	41
5.2.1.3	Absorption d'énergie à la rupture.....	42
5.2.1.4	Indice d'éclatement .....	43
5.2.1.5	Indice de déchirure .....	45
5.2.2	Propriétés optiques du papier.....	46
5.2.2.1	Blancheur .....	46
5.2.2.2	Opacité .....	48
5.2.2.3	Coefficient de diffusion de la lumière.....	49

Chapitre 6 - Conclusions.....	51
Bibliographie.....	54
Annexe 1. Propriétés des pâtes et papiers .....	62



## Liste des Figures

Figure 2-1. Séparation selon le procédé de mise en pâte mécanique	5
Figure 4-1. Le procédé de raffinage	25
Figure 4-2. Paramètres évalués des pâtes	26
Figure 5-1. Intensité de raffinage vs Énergie Spécifique	27
Figure 5-2 Indice d'égouttage vs Énergie Spécifique	29
Figure 5-3. Taux de rejets vs CSF	31
Figure 5-4. Longueur moyenne des fibres vs CSF	32
Figure 5-5. Indice d'égouttage vs Volume Spécifique par sédimentation	33
Figure 5-6. Volume Spécifique par sédimentation vs Fines P200	34
Figure 5-7. CSF de la fraction (R100 + R200) vs CSF	35
Figure 5-8. Potentiel de liaison vs CSF	36
Figure 5-9. Épaisseur de paroi cellulaire vs longueur moyenne de fibre (R28)	37
Figure 5-10. Épaisseur de paroi cellulaire vs longueur moyenne des fibres (R48)	38
Figure 5-11. Épaisseur de paroi cellulaire vs longueur moyenne des fibres des fractions R28 et R48	39
Figure 5-12. Bouffant vs CSF	40
Figure 5-13. Indice de Rupture vs Densité	41
Figure 5-14. AER vs Indice d'égouttage	43
Figure 5-15. Indice d'éclatement vs Indice d'égouttage	44
Figure 5-16. Indice de déchirure vs Longueur moyenne des fibres	45
Figure 5-17. Blancheur vs Indice d'égouttage	47
Figure 5-18. Opacité vs Indice d'égouttage	48
Figure 5-19. Coefficient de diffusion de la lumière vs Indice de rupture	49
Figure 5-20. Coefficient de diffusion de la lumière vs CSF	50

## Liste des Tableaux

Tableau 2-1. Comparaison des procédés de mise en pâte mécanique.	7
Tableau 2-2. Caractéristiques des pâtes PTM de diverses essences	10
Tableau 3-1. Propriétés mécaniques du bois de trois espèces	15
Tableau 3-2. Morphologie des fibres du mélèze, du pin gris et de l'épinette noire	16
Tableau 3-3. Caractéristiques physiques générales du pin gris et l'épinette noire.	17
Tableau 3-4. Caractéristiques chimiques du pin gris et l'épinette noire.	18
Tableau 3-5. Propriétés comparatives de la PTM de pin gris	20
Tableau 3-6. Propriétés comparatives de la pâte OPCO de pin gris	20
Tableau 3-7. Propriétés comparatives de la pâte PCTM de pin gris	21
Tableau 4-1. Méthodes d'analyse des papiers.	26
Tableau 5-1. Méthodes d'analyse des fractions.	33

## Liste des Abréviations

PMM	Pâte mécanique de meule
PMMP	Pâte mécanique de meule sous pression
PMR	Pâte mécanique de raffineur
PTM	Pâte thermomécanique
PCM	Pâte chimicomécanique
PCTM	Pâte chimicothermomécanique
PMD	Pâte mécanique de défibreur
RTS	Temps de rétention court, haute température et vitesse de rotation élevée
CES	Consommation d'énergie spécifique
VSS	Volume spécifique par sédimentation
AER	Absorption d'énergie à la rupture
CSF	Indice d'égouttage

## Liste des équations

$$\tau = \frac{\mu_r}{\mu_i} \frac{a E C_i L}{\omega^3 [L(r_2^2 - r_1^2) + C_i E r_1^2]} \left[ \ln \frac{r_2}{r_1} - \frac{1}{2} \ln \left( \frac{L - C_i E}{L} \right) \right] \quad (1) \quad 12$$

$$n = N h \omega \frac{r_1 + r_2}{2} \tau \quad (2) \quad 13$$

$$e = \frac{E}{n} \quad (3) \quad 13$$

$$e = \frac{2}{h \omega (r_1 + r_2)} \frac{E}{N \tau} \quad (4) \quad 13$$

$$\dot{e} = \frac{E}{\tau} \quad (5) \quad 13$$

$$\frac{\dot{e}}{e} = \frac{n}{\tau} \quad (6) \quad 13$$

# Chapitre 1 - Introduction

## 1.1 Problématique

L'industrie de pâtes et papiers est encore très dépendante des ressources forestières. Ces ressources représentent près de 78% du total de fibres papetières utilisées au Canada. Le groupe des espèces forestières le plus utilisé est celui des conifères, qui représentent les trois quarts du volume de la récolte [1]. De ce nombre, les épinettes constituent 37,6%, les pins 22,4%, et le sapin baumier 15% d'un volume de bois mou de 20 256,9 millions m<sup>3</sup>. Dans le groupe des pins, le pin gris est le plus important, 20,4% du volume total de résineux. Ce volume est presque le double de celui de l'épinette noire seule (12%).

Depuis des années, les usines de pâtes et papiers du Québec utilisent beaucoup plus de résineux traditionnels, tels que l'épinette noire et le sapin, que de feuillus pour produire des pâtes mécaniques, en raison du fait qu'elles sont facilement utilisables pour produire des pâtes mécaniques [2, 3, 4].

Dans les pâtes mécaniques, l'utilisation de pin gris est habituellement limitée à moins de 20% pour la plupart des usines. Cependant, au cours de la dernière décennie, la diminution de la disponibilité des espèces traditionnelles dans l'industrie papetière, comme l'épinette noire et le sapin, ainsi que la nécessité d'utiliser d'autres espèces ont commencé à contraindre l'utilisation du pin gris dans les usines de pâtes et papiers [5, 6, 7]. L'industrie de pâtes et papiers se voit donc forcée d'utiliser des quantités de plus en plus importantes de pin gris. Il est donc probable que le pin gris devienne une source d'approvisionnement de plus en plus utilisée dans les usines de pâtes et papiers dans l'avenir [8].

Dans la mise en pâte chimique, le pin gris peut être utilisé dans les procédés alcalins, mais il reste une espèce non désirable pour les procédés au sulfite acide.

Plusieurs caractéristiques du pin gris empêchent son utilisation dans le secteur papetier. Les fibres de pin gris ont une paroi cellulaire épaisse et une rigidité accrue. Elles ont

besoin d'une plus grande quantité d'énergie de raffinage pour obtenir le même niveau d'aplatissement des fibres que l'épinette [5]. La haute teneur en matières extractibles cause des problèmes de poix sur les machines à papier, ce qui entraîne des problèmes de formation et des casses plus fréquentes [9, 10, 11]. Le pin gris nécessite de 25 à 50% plus d'énergie de raffinage que l'épinette noire pour arriver à un indice d'égouttage donné malgré le fait que le développement des propriétés de liaison demeure moindre [5, 12, 13, 14]. La blancheur de la pâte de pin gris est inférieure par rapport à celle du mélange de sapin –épinette [8].

## 1.2 Objectif

Ces dernières années, beaucoup de travaux ont été réalisés afin de surmonter les problèmes associées au pin gris dans la mise en pâte à haut rendement dont la haute teneur en matières extractibles, la forte consommation d'énergie et ses faibles propriétés [15, 16]. Lanouette et al. [15, 16] ont étudié l'effet de différentes solutions de trempage. Le traitement au peroxyde alcalin permet d'obtenir de bonnes propriétés de résistance et de réduire l'énergie spécifique de raffinage mais les propriétés optiques demeurent faibles, surtout le coefficient de diffusion qui est affecté par la présence de produits chimiques. Malgré tout cela, le pin gris reste encore une espèce sous-exploitée dans le procédé de mise en pâte mécanique jusqu'à présent [2]. Cela nous mène à investiguer le développement des fibres de pin gris lors du raffinage pour avoir une bonne qualité de la feuille et ainsi augmenter son utilisation dans le domaine papetier.

Dans ce cas, lors du raffinage, les fibres sont développées d'une façon différente suivant leur morphologie initiale. Les fibres de bois d'été auront tendance à demeurer plus longues et moins développées tandis que les fibres de bois de printemps sont plus grandement abîmées par le processus de raffinage, conduisant à des pâtes plus fortes et des fibres plus flexibles.

Ce développement n'est cependant pas très connu et très ciblé. Les méthodes de mesure des épaisseurs de parois cellulaires se sont beaucoup développées au cours des dernières années, ce qui nous permet actuellement de suivre un peu mieux le chemin suivi par

chaque type de fibre dans le procédé. Le présent travail propose une étude sur le développement des diverses fractions de fibres Bauer McNett durant le processus de raffinage et une étude sur l'impact de la température, de l'énergie spécifique et de l'intensité de raffinage sur ce développement pour le pin gris. Les fibres ont été analysées suivant 3 fractions principales: les fibres longues, correspondant au (R14, R28 et R48) du Bauer McNett; les fibres moyennes et courtes (R100 +R200) et les fines. Nous tenterons donc de suivre le développement de ces 3 fractions spécifiques pour différents types de traitements initiaux, pour tenter de trouver une relation cause à effet.

## **Chapitre 2 - Mise en pâte à haut rendement**

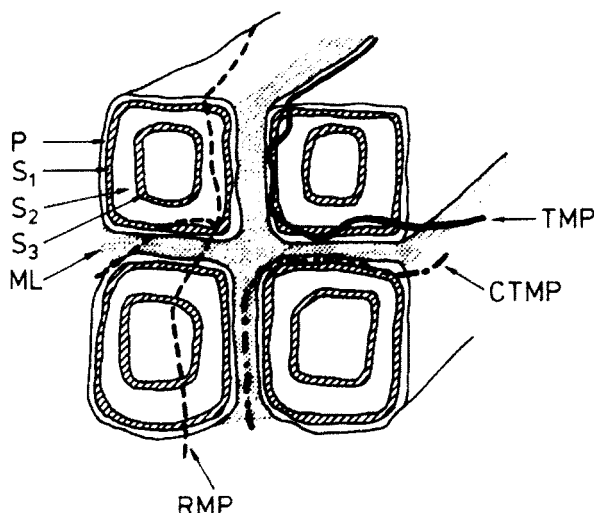
Une pâte à haut rendement ou pâte mécanique est obtenue par séparation mécanique des fibres à partir de rondins de bois ou de copeaux de scierie. Elle se caractérise par un rendement en pâte supérieur à 80%, c'est-à-dire qu'une tonne de bois produit de 800 à 950 kg de pâte mécanique, et une consommation électrique importante (de 1500 à 3000 kWh/t). Par rapport aux pâtes chimiques, ces procédés n'éliminent que peu les composants du bois. Pour améliorer la qualité papetière de ces pâtes, des traitements thermiques et/ou chimiques plus ou moins poussés peuvent être effectués avant les traitements mécaniques [17]. De nombreux procédés ont été développés depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle pour améliorer la qualité de la pâte finale et pour diminuer la consommation énergétique [17, 18, 19] tels que le procédé de mise en pâte mécanique de raffineur (PMR), le procédé de mise en pâtes thermomécanique (PTM), le procédé chimiothermomécanique et le procédé chimicomécanique. Dans ce travail, nous parlons seulement de (PMR) et (PTM).

### **2.1 Procédés de mise en pâte mécanique**

Durant la mise en pâte mécanique, les copeaux de bois sont séparés en fibres individuelles en appliquant une force mécanique. L'objectif principal de l'utilisation d'un traitement mécanique est de transformer les copeaux de bois directement en fibres avec un haut rendement de mise en pâte. Dans ce cas, presque toutes les composantes originales du bois se retrouvent dans le produit final.

Généralement, le procédé de mise en pâte mécanique se divise en une étape de séparation des fibres suivie d'une étape de développement de la surface des fibres [19, 20].





**Figure 2-1. Séparation selon le procédé de mise en pâte mécanique [19]**

La figure 2-1 illustre la trajectoire de la fissure dans le bois qui est utile pour expliquer les mécanismes impliqués. Dans la mise en pâte PTM, l'étuvage des copeaux a pour effet d'amener le bois près ou au dessus de la température de transition vitreuse de la lignine permettant ainsi une meilleure séparation des fibres comparativement aux procédés à plus basse température (PMR). La rupture se fait préférentiellement à l'interface des parois S1 et S2. Avec une augmentation progressive de la température, la rupture a lieu préférentiellement dans la lamelle mitoyenne. Les fibres sont plus longues mais moins fibrillées. Le traitement chimique, par exemple le traitement au sulfite des copeaux, favorise aussi une rupture dans la lamelle mitoyenne. Les fibres sont moins fibrillées par des traitements modérés, mais elles sont plus flexibles suite à la sulfonation de la lignine et la présence de groupements ioniques ( $\text{SO}_3^-$ ) dans la paroi S2 qui permet le gonflement de la fibre et lui confère une meilleure flexibilité [21].

Dans un procédé de mise en pâte mécanique on doit rechercher les caractéristiques suivantes :

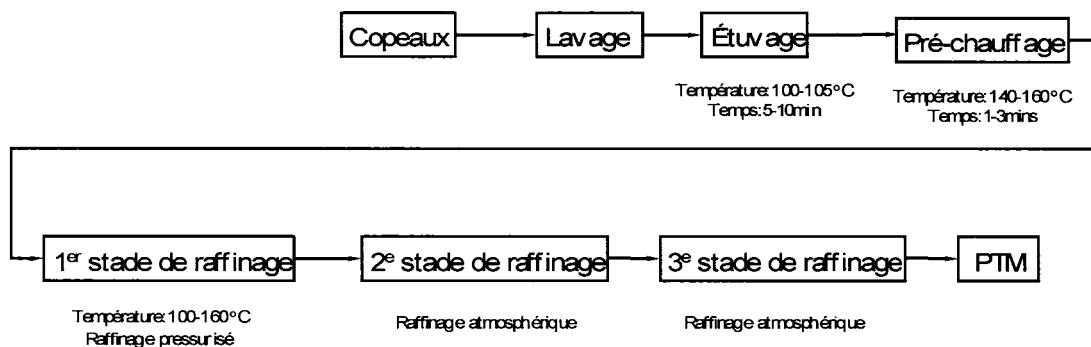
- Une bonne séparation des fibres
- La conservation de la longueur des fibres.

- La délamination des fibres (fibrillation interne)
- Une grande quantité de fines possédant des caractéristiques intéressantes de liaison et de diffusion de la lumière produites par la lamelle mitoyenne et les parois primaires et secondaire.
- Une paroi secondaire bien fibrillée (liaison interfibre)

Afin que tous ces processus aient lieu simultanément, la désintégration de la fibre doit avoir lieu sur un endroit précis de la paroi de la cellule. Les différentes composantes de la cellule ont des points de ramollissement spécifiques permettant de ramollir la zone de la cellule qui interagissant avec les autres cellules.

### 2.1.1 Pâte thermomécanique (PTM)

La pâte thermomécanique est produite à l'aide d'un raffineur pressurisé où la pression de vapeur correspond à la température de la vapeur saturée. Son application est basée sur la technologie de PMR [19], la réduction en pâte par voie thermomécanique (PTM) est toujours largement employée pour produire des pâtes présentant une forte résistance à la déchirure destinées à la fabrication de papier journal et de carton [22]. Aujourd'hui, les pâtes mécaniques représentent environ le quart de la production mondiale de pâtes et papiers. La figure 2-2 nous montre un digramme du procédé PTM.



**Figure 2-2. Diagramme du procédé PTM**

Avant d'entrer dans le raffineur, les copeaux de bois sont normalement préchauffés à l'aide de vapeur à une température d'environ 100 °C. Après le préchauffage, les copeaux sont chauffés à une température près de la température de transition vitreuse de la lignine dont l'effet est d'amener à ramollir les copeaux, ce qui facilite la séparation des fibres de bois et réduit les dommages aux fibres individuelles [19].

Le contenu en fibres longues et en fines sont les paramètres les plus importants pour mesurer les propriétés des pâtes PTM. Si on la compare avec la pâte PMMP (Pâte mécanique de meule sous pression), la pâte PTM possède un plus haut contenu en fibres longues, de meilleures propriétés physiques et moins de fines.

De plus, les fibres des pâtes PTM sont moins endommagées que celles des pâtes PMD (Pâte mécanique de défibreur) ou PMR (Pâte mécanique de raffineur). Le papier fabriqué avec la PTM a donc un bon bouffant et une meilleure résistance, particulièrement la résistance à la déchirure, que la pâte PMD (tableau 2.1). Les caractéristiques des pâtes PTM permettent le remplacement des pâtes mécaniques traditionnelles et aussi partiellement des pâtes de renforcement pour certains types de papier tels que le papier journal, le papier support couché et le papier tissu. Malheureusement, ce procédé consomme beaucoup plus d'énergie spécifique lors du raffinage et confère aux pâtes une plus faible opacité [17, 19, 23, 24].

**Tableau 2-1. Comparaison des procédés de mise en pâte mécanique [28].**

Propriété	PMD	PMR	PTM
Énergie spécifique, MJ/kg	5,0	6,4	7,0
Indice d'éclatement, kPa m <sup>2</sup> /g	1,4	1,9	2,3
Indice de déchirure, mN m <sup>2</sup> /g	4,1	7,5	9,0
Indice de bouffant, cm <sup>3</sup> /g	2,5	2,9	2,7
R 48 Bauer McNett*	28	50	55
Teneur en bûchettes, %	3,0	2,0	0,5
Blancheur	61,5	59	58,5

\* Mesure relative de la teneur en longues fibres.

Le procédé RTS est un développement récent de la technologie de mise en pâte PTM. Il emploie un court temps de résidence (R), une haute température (T) et une vitesse de rotation élevée (S) durant le premier stage de raffinage pressurisé [19, 25]. La haute température, qui est supérieure à la température de transition vitreuse de la lignine, ramollie les copeaux de bois pendant que le bas temps de résidence permet d'éviter de perdre le niveau de blancheur de la pâte.

### **2.1.2 Pâte mécanique de raffineur (PMR)**

La fabrication industrielle de la pâte mécanique de raffineur (PMR) a commencé en 1960. Les pâtes mécaniques de raffineurs (PMR) sont obtenues par défibrage des copeaux de bois entre des raffineurs à disques travaillant à pression atmosphérique [26,27]. Le procédé comprend habituellement deux stades de raffinage atmosphériques, avec des consistances de 16 à 25%. Durant le raffinage, les copeaux traversent l'espace entre la surface des deux disques. La pâte PMR possède plus de fibres longues, une meilleure résistance mécanique mais, par contre, des propriétés optiques inférieures à celles de la pâte de meule. La pâte PMR est également plus grossière et a un indice de bouffant plus élevé que celui de la pâte de meule [28, 22].

Au 1<sup>er</sup> stade de raffinage du procédé PMR, le volume de matière première à utiliser nécessite un écart assez grand des disques des raffineurs. Au 2<sup>e</sup> stade de raffinage, l'écart est réduit en raison de la diminution de la taille du matériel fibreux. Pendant le raffinage, la lignine subit un ramollissement par compression et décompression, ainsi que par l'effet du frottement bois-bois et métal-bois qui s'exercent entre le disque. Dans le raffineur, les copeaux sont défaits en fragments plus petits et enfin en fibres qui se dévident et tournoient après le raffinage [29]. Le 1<sup>er</sup> stade de raffinage consomme deux fois plus d'énergie que le 2<sup>e</sup> stade. La production de la pâte de PMR requiert une énergie spécifique moyenne de 6 GJ/t [28].

## **2.2 Facteur influençant la qualité de la pâte**

Pendant la mise en pâte PTM, il y a un grand nombre de facteurs, tels que l'essence de bois, l'énergie spécifique, l'intensité de raffinage, la température et la pression de raffinage, les plaques de raffineurs, la vitesse de rotation, la consistance, le taux de production etc. [19, 30], qui influencent la qualité des pâtes PTM. Nous allons ici principalement nous concentrer sur l'essence de bois, l'énergie spécifique et l'intensité de raffinage, influençant la qualité de la pâte PTM.

### **2.2.1 Essence de bois**

L'essence de bois a un effet significatif sur la pâte PTM. Ceci en raison des différentes compositions du bois et des propriétés morphologiques différentes entre les fibres de résineux et de feuillus. Plassat [31] montre qu'une même essence de bois présente, selon son lieu de croissance, des caractéristiques biologiques qui peuvent varier considérablement : un hêtre de montagne (Pyrénées) et un hêtre de plaine humide (Normandie) présentent des cernes d'accroissement très différents en concentricité et en largeur, déterminant des résistances mécaniques non identiques (écart pouvant atteindre 15 %) et des comportements en stabilité allant du prévisible à l'aléatoire. La masse volumique varie également, pour une même essence, dans une fourchette pouvant atteindre 20 % de la valeur moyenne. Le même bois générique, approvisionné en volume important, donc de provenance non homogène, peut alors présenter des dispersions de caractéristiques parfois gênantes pour l'industrie. L'essence de bois est probablement le paramètre le plus important influençant les propriétés de la pâte PTM et même de toutes les pâtes mécaniques [30].

Les épinettes représentent la famille la plus intéressante pour la mise en pâte mécanique en raison de son bas contenu en matières extractibles, sa blancheur initiale élevée et sa bonne résistance. L'essence du bois feuillus pourrait être utilisée comme matière première lors de la mise en pâte PTM. Par contre la plupart des essences de bois feuillus ont besoin d'un traitement chimique pour améliorer leurs propriétés. Le Tableau 2-2 [30] montre des caractéristiques des pâtes PTM de diverses essences de bois.

**Tableau 2-2. Caractéristiques des pâtes PTM de diverses essences [30]**

Propriété	Épinette / Sapin	Pin gris	Tremble
Énergie spécifique, MWh/t	1,92	2,20	
Bauer McNett, +14 mailles/po, %	12,2	7,0	
Bauer McNett, -200 mailles/po, %	30,2	32,5	
Longueur de fibres, mm	1,29	1,00	
Rejet, %	0,45	0,10	0,5
Densité, kg/m <sup>3</sup>	391	341	365
Indice de rupture, Nm/g	40,8	34,9	23
Indice de déchirure, mN*m <sup>2</sup> /g	9,4	8,5	3,1
Coeff. Diffusion, m <sup>2</sup> /kg	63,5	59,4	68,0
Blancheur ISO, %	58,0	47,8	58,0

Afin d'obtenir une meilleure qualité de la pâte, la qualité des copeaux doit donc être soigneusement vérifiée. Il faut surveiller aussi les autres paramètres tels que la densité et l'humidité du bois, la longueur et l'épaisseur des fibres, l'épaisseur des parois des fibres et l'angle des fibrilles.

### 2.2.2 Énergie spécifique

L'énergie spécifique est la quantité d'énergie appliquée par masse de pâte en MJ/kg de pâte sèche ou en kWh/t sèche. La quantité d'énergie appliquée ainsi que la façon dont elle est appliquée déterminera les propriétés finales de la pâte. L'énergie spécifique est donc un facteur important pour la production de pâte PTM. D'après (tableau 2-1) ci-dessus, le procédé PTM consomme beaucoup d'énergie lors du raffinage; la pâte PTM prend plus d'énergie spécifique que la pâte PMD. Par ailleurs, l'essence de bois influence beaucoup la quantité d'énergie spécifique consommée. Munster [32] et Tyrväinen et al [33] affirment que le pin gris demande plus d'énergie spécifique de raffinage et possède de moins bonnes propriétés de liaisons que l'épinette noire. Ces différences sont dues à la morphologie des fibres de pin gris ainsi qu'à son plus haut taux de résines. L'énergie spécifique requise dépend aussi de la sorte de papier à fabriquer [34].

### 2.2.3 Intensité de raffinage

Les facteurs les plus importants décrivant le processus de raffinage sont la consommation d'énergie spécifique (CES) et l'intensité de raffinage qui décrit comment est appliquée l'énergie. Il existe différents concepts de raffinage tels que :

#### Raffinage doux (basse intensité) :

Produit une pâte bien fibrillée avec longueur de fibre élevée.

Condition : Haute énergie spécifique de raffinage et consistance, temps de résidence long.

#### Raffinage sévère (haute intensité) :

Produit une pâte moins fibrillée avec longueur de fibre plus faible.

Condition : Basse énergie spécifique de raffinage et consistance, temps de résidence faible.

L'intensité de raffinage est l'énergie appliquée en moyenne durant chaque impact des barres du raffineur avec la pâte (Énergie spécifique / Impact) en  $\text{GJ} / \text{t} / \text{impact}$ .

Pour tenter d'expliquer les effets du raffinage sur la fibre, plusieurs théories ont vu le jour. Elles sont basées sur le fait que le raffinage est fonction de deux facteurs principaux [35] :

- la quantité d'énergie appliquée
- la manière dont elle est appliquée.

Citons par exemple la théorie du nombre et de la sévérité d'impacts. Cette théorie permet de plus de comparer des raffineurs très différents en dimension. Une certaine terminologie a été adoptée par plusieurs auteurs.

- N : nombre d'impacts que les fibres subissent lors de leurs passage dans le raffineur.
- S : la sévérité de ces impacts.
- e : l'énergie spécifique par impact.

Miles [36] a développé des équations qui permettent de calculer la vitesse radiale de la pâte dans le raffineur à partir des consistances d'entrée et de sortie, de la vitesse de rotation et du diamètre de raffineur. Cette vitesse déterminera le temps de résidence des fibres dans le raffineur et, par conséquent, le nombre d'impacts qu'elles auront à subir.

D'après Miles, le temps de résidence  $\tau$  peut être calculé à partir de la relation suivante :

$$\tau = \frac{\mu_r}{\mu_t} \frac{a E C_i L}{\omega^3 [L (r_2^2 - r_1^2) + C_i E r_1^2]} \left[ \ln \frac{r_2}{r_1} - \frac{1}{2} \ln \left( \frac{L - C_i E}{L} \right) \right] \quad (1)$$

où :

$\omega$  = La vitesse angulaire du disque.

$\mu_r$  et  $\mu_t$  = Les coefficients de friction entre la pâte et les éléments de raffinage dans la direction radiale et tangentielle, respectivement.

$C_i$  = La consistance à l'entrée.

$r_1$  et  $r_2$  = Les rayons internes et externes de la zone de raffinage.

$a = 4$  pour le simple disque raffineur, 2 pour le raffineur à double disques.

$E$  = L'énergie spécifique

$L$  = La chaleur latente de la vapeur.

D'après Miles, le nombre d'impact (**n**) peut être déterminé à partir de la relation suivante :



$$n = N h \omega \frac{r_1 + r_2}{2} \tau \quad (2)$$

où :

N = nombre des barres par unité de longueur de l'arc.

h = 1 pour disque simple de raffineur, 2 pour le raffineur à double disques.

L'intensité de raffinage (e) est défini comme énergie spécifique par impact, est calculée par la relation suivante :

$$e = \frac{E}{n} \quad (3)$$

où :

E = Énergie spécifique

n = Nombre d'impacts

D'où

$$e = \frac{2}{h \omega (r_1 + r_2)} \frac{E}{N \tau} \quad (4)$$

La puissance spécifique ( $\dot{e}$ ) est calculée selon la relation suivante :

$$\dot{e} = \frac{E}{\tau} \quad (5)$$

Selon Stationwala et al. [66], les mesures d'intensité peuvent être combinées par un ratio :

$$\frac{\dot{e}}{e} = \frac{n}{\tau} \quad (6)$$

Arjas [37] nous montre l'importance du temps de résidence et que le design et les paramètres d'opération du raffineur influencent la distribution du temps de résidence pouvant ainsi conduire à des pâtes plus ou moins homogènes. Lors du raffinage il est donc possible de diminuer l'indice d'égouttage en variant le nombre et la sévérité des impacts.

Siewert et Selder [38] a observé que l'économie d'énergie spécifique de raffinage (ou puissance effective appliquée par unité de poids de fibre sèche) augmente avec l'accroissement de charge spécifique de lame puis diminue quand la charge continue de croître. Il existe donc un optimum dans l'utilisation efficace de l'énergie de raffinage pour chaque pâte qui dépend dans chaque cas de caractéristiques de la pâte.

Stationwala et al. [39] affirme qu'au dessus d'un seuil minimal la combinaison d'une basse énergie appliquée à haute intensité au premier stade, suivi d'un second stade à basse intensité, serait bénéfique. En effet, cette étude a montré qu'une faible intensité produit des pâtes plus résistantes mais de faible opacité tandis qu'à haute intensité la pâte produite aurait une plus faible résistance mais de meilleures propriétés d'impression.

## Chapitre 3 - Le pin gris

### 3.1 Le pin gris comme matière première

L'Amérique du Nord compte 34 espèces indigènes [40, 41]. Parmi celles-ci on compte le pin gris qui est le pin typique de la forêt boréale et qui a une grande aire de répartition au Canada [42, 40, 41]. Sa présence s'étend depuis la Nouvelle Écosse jusqu'au Nord de l'Alberta et vers la région des Grands Lacs, aux États-Unis [43, 44]. Le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) est l'essence commerciale la plus abondante au Canada; parmi le conifère il représente 22,4% du volume total de bois résineux; chez le pin, le pin gris est le plus important, il représente 20% de tout volume de bois résineux et son volume est presque le double de celui de l'épinette noire (12%) [1].

Depuis longtemps, le pin gris est une espèce désirable au niveau sylvicole car il résiste très bien aux maladies et sa croissance est rapide [45]; il croît facilement sur un sol pauvre, peut supporter des climats extrêmement froids. Le pin gris possède un taux de croissance rapide relativement à l'épinette noire (*Picea mariana*). Sous des conditions de croissance favorables, le pin gris atteint entre 21 et 24 m de hauteur et entre 30 et 38 cm de diamètre [46]. Sa population au Canada est mature ou sur-mature. Le duramen du pin gris est brun pâle et l'aubier est presque blanc. En ce qui concerne les propriétés mécaniques du bois, le pin gris est classé dans une catégorie moyenne [47]. Certaines propriétés mécaniques du bois de pin gris, d'épinette et de sapin sont montrées au tableau 3.1.

**Tableau 3-1. Propriétés mécaniques du bois de trois espèces [47]**

Propriété (analyse sur le bois vert)	Pin gris	Épinette	Sapin
Densité relative	0,42	0,41	0,34
Module de rupture, MPa	43	41	37
Module d'élasticité, MPa	8100	9100	7800
Résistance au cisaillement, MPa	5,7	5,5	4,7

On trouve le pin gris en peuplement pur ou en mélange avec d'autres essences comme l'épinette noire, l'épinette blanche, le sapin, etc. [42]. Le bois de pin gris est modérément dur et lourd et la texture est plutôt irrégulière.

Le bois du pin gris est utilisé dans la construction générale, pour la production de traverses de chemin de fer et de poteaux. Jusqu'à un certain point, ce bois est utilisé dans l'industrie des pâtes [42, 48].

## 3.2 Caractéristiques du pin gris

### 3.2.1 Morphologie

Du point de vue morphologique, tableau 3-2 [49] montre que les fibres de bois du pin gris sont un peu plus longues que celles de l'épinette noire et du mélèze. D'autre part, l'épaisseur de la paroi fibreuse est comparable pour les trois essences de bois de printemps. Cependant, pour le bois d'été, la paroi de la fibre du pin gris est plus épaisse que celle d'épinette noire et pourrait entraîner une consommation d'énergie spécifique plus importante lors du raffinage.

**Tableau 3-2. Morphologie des fibres du mélèze, du pin gris et de l'épinette noire [49]**

	Mélèze	Pin gris	Épinette noire
Longueur moyenne, mm			
arithmétique	0,87	1,89	1,77
pondérée en longueur	2,24	2,91	2,48
pondérée en poids	2,91	3,31	2,75
Diamètre, $\mu\text{m}$			
bois de printemps	58	34	38
bois d'été	29	19	14
Masse linéique, mg/m	0,327	0,193	0,200
Épaisseur de la paroi, $\mu\text{m}$			
bois de printemps	2,78	2,78	2,78
bois d'été	5,67	4,55	4,09

Évidemment, une paroi plus épaisse rend la fibre plus rigide; ce qui rend le réseau fibreux moins compact et permet la production d'un papier plus bouffant en plus d'en

réduire la résistance à la rupture et à l'éclatement. Par conséquent, la paroi épaisse en bois d'été du pin gris rend les fibres plus rigides. La masse linéique est presque semblable pour les fibres du pin gris et celles de l'épinette noire.

### 3.2.2 Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques du bois jouent un rôle primordial dans la détermination de la qualité de la pâte. Les caractéristiques physiques générales du pin gris et de l'épinette noire sont présentées au tableau 3-3.

**Tableau 3-3. Caractéristiques physiques générales du pin gris et l'épinette noire.**

Caractéristique	Pin gris	Épinette noire	Référence
Couleur			
Aubier	Blanc avec des empreintes jaunâtre	Blanc	[45]
Duramen	Empreintes rougeâtre	Blanc Jaunâtre	[45]
Blancheur du bois, %	40,4	42,3	[50]
Zone de bois d'été	Large	Étroite	[51]
Pourcentage d'humidité			
Bois frais (vert)	51	28	[45]
Bois séché au four	105	38	[45]
Densité, kg/m <sup>3</sup>			
Frais (vert)	801	565	[45]
Four sec	464	448	[45]
Ratio flexibilité			
Bois printemps	0,77	0,82	[52]
Bois d'été	0,39	0,51	[52]
Coefficient de rigidité			
Bois printemps	1,2	1,1	[52]
Bois d'été	3,2	2,9	[52]

En général, le pin gris est relativement plus foncé (matières extractibles); le duramen du pin gris est rougeâtre comparé à blanc jaunâtre pour celui de l'épinette noire [45], se traduisant par une blancheur de surface plus faible pour le pin gris [50]. Le pin gris a une densité spécifique légèrement supérieure à celle de l'épinette noire, causée par une paroi cellulaire plus épaisse et un pourcentage de bois d'été plus élevé [45]. Ces propriétés contribuent à une rigidité des fibres plus élevée [52].

### 3.2.3 Caractéristiques chimiques

L'information sur la composition chimique du bois de pin gris et d'épinette noire est montrée au tableau 3-4. Selon cette information, la teneur de lignine de Klason du bois de pin gris est presque semblable à celle de l'épinette noire. En ce qui concerne les matières extractibles, le bois de pin gris contient des quantités de produits solubles dans les solvants organiques, plus élevées que celles de l'épinette noire. Les caractéristiques chimiques du pin gris, qui le différencient de l'épinette noire, sont la solubilité plus élevée dans l'alcool-benzène et dans l'éther et aussi le contenu faible en cendres. Nous pouvons affirmer que le pin gris contient un peu plus d'extractibles que l'épinette noire. Pour un échantillon donné, la quantité de matières extractibles varie selon le type de solvant utilisé et la position des constituants dans le bois. L'éther est le meilleur solvant pour dissoudre les résines et les graisses car elles ont une polarité moléculaire basse, semblable à celle du solvant.

**Tableau 3-4. Caractéristiques chimiques du pin gris et l'épinette noire.**

Composants	Pin gris	Épinette noire	Références
Lignine de Klason, %	28,5	28,0	[49]
Pentosanes, %	8,15	7,63	[49]
Matières extractibles			
au DCM, %	2,20	1,71	[49]
Solubilité, %			
eau froide	3,76	3,76	[49]
eau chaude	3,09	3,65	[49]
1% NaOH	13,3	12,1	[49]
alcool/benzène	4,0	2,2	[8]
éther	4,3	1,0	[8]
méthanol	3,0	1,6	[52]
Teneur en cendres, %	0,244	0,346	[52]

Sinclair et Dymond [53] rapporte que la principale différence entre les extractibles du duramen et celle de l'aubier du pin gris est la présence de flavones et de groupes phénoliques plus complexes dans le duramen. Par rapport à l'épinette noire, le pin gris a une concentration plus élevée en résine et en graisse [54].

Les résines peuvent causer un problème de poix sur la machine à papier en raison de leur très basse solubilité dans l'eau, ce qui peut perturber la production. En plus, les résines influencent de façon négative les propriétés optiques et physiques du papier. Les flavonoides pourraient causer une réversion de couleur du papier pendant l'entreposage.

### **3.3 Le pin gris dans l'industrie des pâtes et papiers**

Au Canada, le pin gris est utilisé comme matière première dans l'industrie des pâtes et papiers [42]. Le bois de pin gris est facilement transformé dans le procédé chimique kraft [9]. Toutefois, la diminution des forêts naturelles de la province, spécialement au niveau de la quantité de bois résineux, et de la croissance du volume de production du papier journal, contribue à la diminution de copeaux disponibles pour la production de pâtes et papiers. L'industrie papetière québécoise, comme dans le reste de l'Amérique du Nord, fait face à une compétition sévère en ce début de XXI<sup>e</sup> siècle. Elle doit donc se tourner vers un approvisionnement en matières premières provenant de bois de plantation ou vers des essences délaissées comme le pin gris. Dans les années soixante-dix, une étude a confirmé qu'un tiers des usines de pâtes au Canada utilisaient déjà 10% ou plus de bois de pin gris comme matières fibreuses [8, 55]. Cependant, l'utilisation de ce bois dans les usines a été involontaire étant donné que le pin gris se trouve en mélange avec autres espèces comme l'épinette et le sapin. Les problèmes du pin gris envisagés par les papetiers sont déjà connus. Les propriétés de la pâte de pin gris sont inférieures lorsque comparées à celles de l'épinette et du sapin, en résistance et en blancheur. De plus, l'utilisation du pin gris occasionne des problèmes de formation de poix dans l'usine [8, 11].

#### **3.3.1 Pâtes PTM de pin gris**

La pâte PTM de pin gris est inférieure en qualité à celle de l'épinette noire. Selon Jossart et al [56] et Garceau [12], produire une pâte thermomécanique de pin gris demande 25 à 50% plus d'énergie spécifique pour un même indice d'égouttage, lorsque comparée à une PTM d'épinette noire. Toutes les propriétés de résistance, à l'exception de l'indice de déchirure, étaient 35% inférieures à celles de l'épinette noire. Ces résultats sont expli-

qués par l'épaisseur de la paroi cellulaire et la masse linéique plus élevées des fibres de pin gris [12]. Tableau 3-5 nous a montré que, malgré la haute teneur en matières extractibles du pin gris, la blancheur de la pâte d'épinette noire est légèrement supérieure.

**Tableau 3-5. Propriétés comparatives de la PTM de pin gris [58]**

Essence	Pin gris	Épinette noire
Type de pâte	PTM	PTM
Indice d'égouttage, mL	150	150
Énergie spécifique, MJ/kg	11,1	8,55
Longueur de rupture, Km	3,46	3,69
Indice d'éclatement, $\text{kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$	1,85	2,25
Indice de déchirure, $\text{mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$	10,04	12,6
Blancheur, % ISO	55,9	58,2
Opacité, %	94,2	94,2

Barbe et al [5] indiquent que les résistances mécaniques des pâtes de pin gris peuvent être améliorées par une sulfonation interstade (procédé OPCO), pour les rendre comparables à une PTM de sapin et d'épinette (tableau 3-6).

**Tableau 3-6. Propriétés comparatives de la pâte OPCO de pin gris [5]**

Espèce	Pin gris			Epinette noire
Type de pâte	PTM	PCTM	OPCO	PTM
Indice d'égouttage, mL	150	150	150	150
Energie spécifique, MJ/kg	10,1	10,9	8,50	9,11
Longueur de rupture, km	2,40	3,76	3,75	3,89
Indice d'éclatement, $\text{kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$	1,60	1,87	2,07	2,63
Indice de déchirure, $\text{mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$	7,75	9,53	8,14	9,56
Blancheur, % ISO	47,5	52,5	47,9	53,6
Opacité, %	97,3	94,0	95,2	96,2



### 3.3.2 Pâte chimicothermomécanique (PCTM)

Le passage du procédé PTM au procédé PCTM, durant la fin des années 70, a conduit à un autre développement important des pâtes mécaniques. Un tel changement entraîne l'utilisation de produits chimiques durant l'étape qui précède le raffinage [57]. Pour le procédé PCTM, on peut utiliser, entre autres, les prétraitements chimiques suivants : (i) l'oxydation avec le  $\text{ClO}_2$ , l'ozone ou l'acide peracétique; (ii) l'utilisation du sulfite de sodium et du NaOH à haute température. Le prétraitement chimique ramollit la lignine et permet une séparation moins dommageable des fibres du bois, ce qui donne une pâte avec une fraction importante de fibres longues et flexibles et une petite fraction de bûchettes par rapport à la pâte PTM. La grande flexibilité des fibres contribue à une meilleure conformabilité des fibres dans la feuille de papier et produit de bonnes propriétés de liaison [58]. Avec le bois de conifère, le prétraitement chimique le plus utilisé est la sulfonation. En ce moment là, la lignine devient plus hydrophile, ce qui améliore l'hydratation et le gonflement et les fibres sont plus flexibles [59].

Les caractéristiques du bois ont aussi un impact sur le prétraitement des copeaux suivi d'un raffinage pressurisé (PCTM). Laliberté et al. [60] ont trouvé que l'épinette répond mieux à la sulfonation que le pin gris.

**Tableau 3-7. Propriétés comparatives de la pâte PCTM de pin gris [60]**

Espèce	Pin gris		Epinette noire	
	PTM	PCTM	PTM	PCTM
Type de pâte				
Indice d'égouttage, mL	146	156	140	177
Energie spécifique, MJ/kg	11,2	12,0	9,7	9,8
Longueur de rupture, km	3,5	3,9	3,7	4,5
Indice d'éclatement, $\text{kPa} \cdot \text{m}^2/\text{g}$	2,2	2,3	2,3	2,8
Indice de déchirure, $\text{mN} \cdot \text{m}^2/\text{g}$	9,1	9,7	8,8	9,6
Blancheur, % ISO	56,1	61,0	54,5	59,0
Opacité, %	91,4	87,5	93,2	90,3

Avec une sulfonation moyenne (0,5% de contenu en groupements sulfoniques) et 10,1 GJ/t d'énergie spécifique, le pin gris produit des pâtes avec un indice d'égouttage plus haut (251 vs 163 mL), un bouffant plus élevé (3,48 vs 3,19 cm<sup>3</sup>/g), ainsi que des résistances à la traction et à l'éclatement plus faibles, accompagnées d'une déchirure plus élevée. Les résultats obtenus ont démontré qu'il était possible d'incorporer jusqu'à 20% de pin gris sans augmenter l'énergie spécifique.

Une observation semblable a été aussi rapportée par Barbe et al. [8] qui ont trouvé que la sulfonation du pin gris produit une pâte avec des propriétés de résistance comparables à celles d'une PTM d'épinette mais il requiert plus d'énergie spécifique.

La différence de sulfonation des fibres de PCTM de ces deux types de bois est causée principalement par leur longueur des fibres et leur masse linéique respectivement différentes.

### **3.3.3 Pâte chimico- mécanique (PCM)**

Le procédé de CMP nécessite l'application d'un prétraitement chimique de la matière fibreuse avant le traitement chimique. Les pâtes CMP requièrent une cuisson des copeaux, avec l'addition d'un pourcentage élevé de réactifs chimiques appliqués à haute température, avant le raffinage à pression atmosphérique [58]. En raison des conditions chimiques du procédé, le rendement de la pâte CMP, de 80 à 90%, est plus bas que celui de la pâte PCTM. Le prétraitement chimique utilisé le plus souvent pour le procédé de CMP est la sulfonation.

On peut produire une pâte chimico-mécanique en utilisant une combinaison de traitements chimiques tels que : Sulfite de sodium (mise en pâte de bois mou); Hydroxyde de sodium; Peroxyde d'hydrogène alcalin (PMPA : Pâte mécanique au peroxyde alcalin ; PTM-PA : Pâte thermomécanique au peroxyde alcalin).

La PCM est utilisée pour améliorer les propriétés de la pâte mécanique ou pour remplacer la pâte chimique dans certains produits comme la pâte à papier journal [61].

La pâte PCM de pin gris a des propriétés mécaniques inférieures à celles de la pâte d'épinette noire pour le même rendement en pâte [62]. Cependant, comme selon Tay et ses collaborateurs [62], une alternative pour améliorer la qualité de la fibre consiste à enlever une partie de la lignine dans le but d'accroître la flexibilité des fibres de pin gris. Ils ont démontré qu'en ajoutant une faible quantité d'anthraquinone soluble (AQS) (0,1%) dans la cuisson au bisulfite, il en résulte une diminution de la lignine de Klason dans la pâte pour un rendement donné. Ils notent aussi que la PCM de pin gris produite par un procédé au bisulfite/AQS à 85% de rendement possède la même capacité de liaison inter-fibres qu'une PCM d'épinette noire à 88% de rendement sans aide de cuisson. Le pH de la liqueur de cuisson s'avère être un paramètre prédominant affectant le rendement en pâte, en lignine, en matières extractibles et en blancheur. L'utilisation d'un aide de cuisson tel que l'AQS peut conduire à une baisse dans la blancheur de la pâte quand un pH de 8 et plus est utilisé [62].

## Chapitre 4 - Méthodologie

### 4.1 Description de la matière première

Dans notre projet, nous utilisons les copeaux de pin gris comme matière première, provenant de la Scierie Abitibi-Consolidated à La Tuque. Dans le but d'assurer la qualité du raffinage et la précision des données finales, les copeaux doivent être classés. Ils contiennent en effet des copeaux sur-dimensionnés et des sciures qui doivent être enlevés. Nous utilisons un classificateur à disque de type Rader, qui classifie selon l'épaisseur des copeaux. Une classification Williams au laboratoire est faite en même temps pour évaluer la distribution en grosseur. Les copeaux qualifiés possèdent une épaisseur inférieure à 6 mm et sans sciures après la classification Rader.

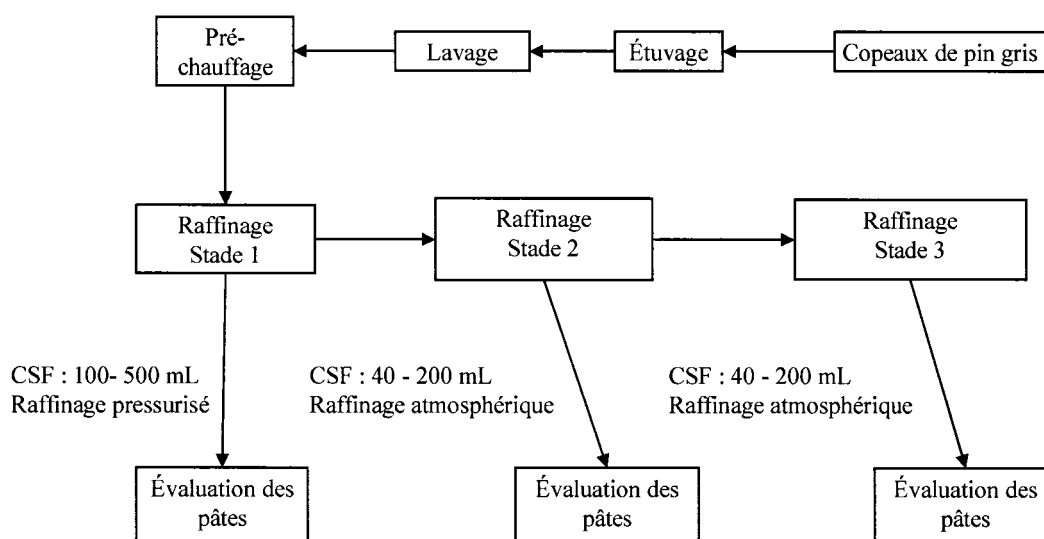
### 4.2 Méthode de raffinage

Tous les essais de raffinage ont été effectués avec le raffineur pilote CD300 (Metso inc) au CIPP à Trois-Rivières.

Afin d'obtenir des pâtes ayant des énergies de raffinage différentes pour des indices d'égouttage variant de 600 à 100 mL, les pâtes de premier stade ont été produites à quatre différentes températures : 100, 120, 140 et 160° C. Les pâtes d'indice d'égouttage de 600 et 350 mL ont été raffinées lors d'un second stade sous pression atmosphérique, pour obtenir des indices d'égouttage de 350 à 60 mL.

La pâte d'indice d'égouttage de 600 mL, raffinée à 350 mL pendant le second stade, a été ensuite raffinée lors d'un troisième stade sous pression atmosphérique pour obtenir un indice d'égouttage de 250 à 60 mL. La consommation d'énergie spécifique (SEC) des trois stades est enregistrée. Nous avons obtenu sur ce chemin une combinaison de diverses énergies spécifiques et intensité de raffinage. L'intensité de raffinage a été calculée à partir des équations de Miles [36].

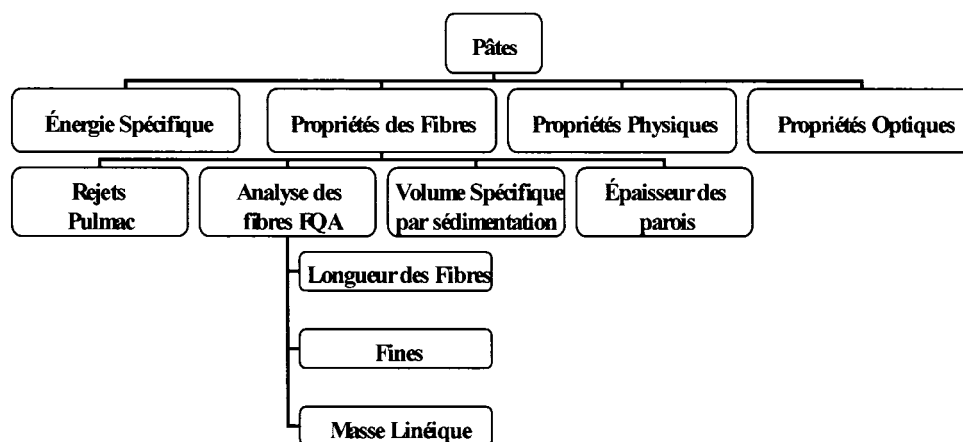
Le procédé de raffinage est illustré à la figure 4-1.



**Figure 4-1. Le procédé de raffinage**

### 4.3 Évaluation des pâtes

Après le raffinage, les pâtes obtenues sont ensuite évaluées. Les paramètres évalués sont illustrés à la Figure 4-2. La consommation d'énergie spécifique se compose de celles des premier, deuxième et troisième stades de raffinage. L'indice de liaison a été utilisé pour suivre le développement de la fraction de fibres longues R14 + R28 [63]. Le Bauer McNett de la fraction R14 + R28 a été employé pour cette mesure au lieu de R28 seulement, pour obtenir assez de pâte, pour les pâtes à bas CSF. Forgacs, dans les années 60 pour la pâte de meule a développé deux indices de qualité, L et S; L étant la quantité de fibres longues et S la surface spécifique des fibres courtes estimée par un CSF sur la fraction R100. Nous avons utilisé cette méthode pour suivre le développement de la fraction R100 et R200. Le volume spécifique par sédimentation (VSS) est déterminé selon la méthode qui a été décrite par Marton et Robie [64] et Luukko [65]. Le taux de rejets Pulmac est déterminé par sur un tamis de 0,010 mm. La longueur des fibres, la teneur en fines et la masse linéique sont déterminées à l'aide d'un analyseur de fibres FQA (Fibre Quality Analyzer, OpTest Equipment Inc.). L'épaisseur de paroi cellulaire est déterminée à l'aide d'un appareil d'analyseur de paroi Morfi (Techpap inc).



**Figure 4-2. Paramètres évalués des pâtes**

Les propriétés du papier ont été mesurées par les méthodes standardisées de ATPPC, présentées au tableau 4.1.

**Tableau 4-1. Méthodes d'analyse des papiers.**

Méthodes d'analyse des papiers		
Méthode	Méthode Standard	Date
Essais Physiques	CPPA D.12	Mai 93
Mesure de la force de déchirure	CPPA D.9	Mai 93
Mesure de la force d'éclatement	CPPA D.8	Mai 93
Mesure des propriétés de rupture	CPPA D.34	Mai 93
Propriétés Optiques (Technibrite)	CPPA E.1, E.2	Mai 93

## Chapitre 5 - Résultats et Discussions

Dans cette section, nous exposons et interprétons les résultats obtenus. La présentation des résultats se fait en deux grands volets :

- Les propriétés de la pâte
- Les propriétés du papier
  - Propriétés Physiques
  - Propriétés optiques

### 5.1 Propriétés de la pâte

#### 5.1.1 Intensité de raffinage

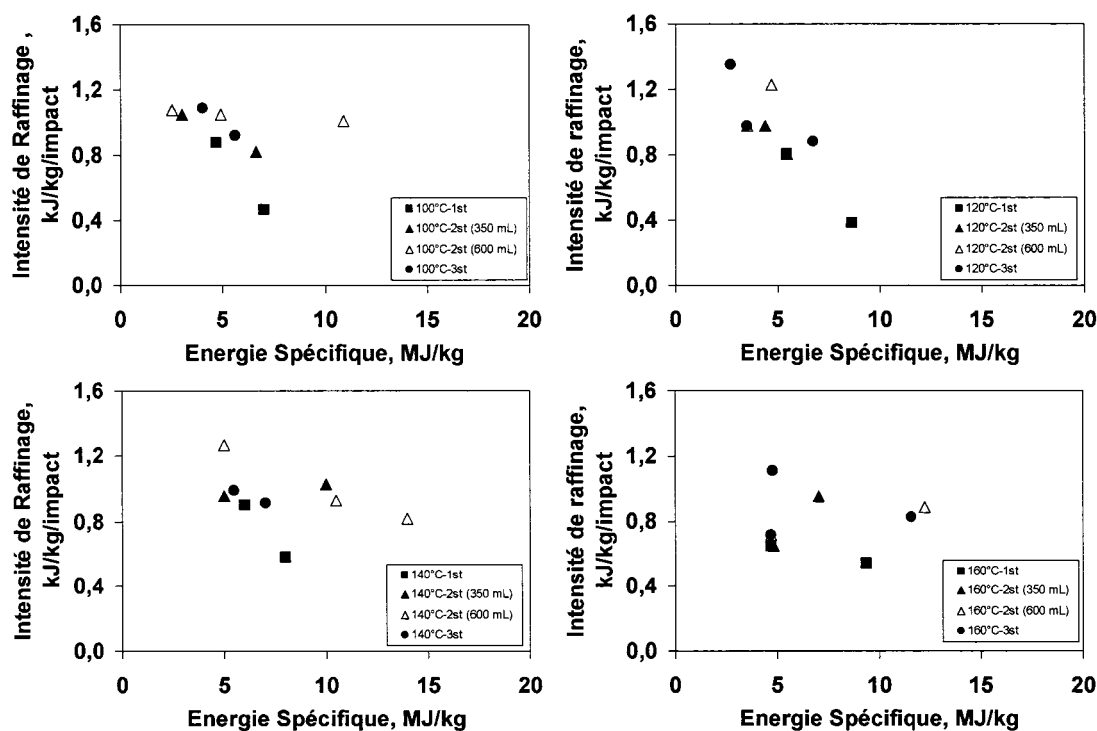


Figure 5-1. Intensité de raffinage vs Énergie Spécifique

L'intensité est définie comme l'énergie spécifique absorbée par chaque impact que subie la pâte lors de son passage entre les lames du raffineur.

D'après la figure 5-1 de l'intensité en fonction de l'énergie spécifique, nous remarquons la diminution de l'intensité avec l'augmentation de la consommation de l'énergie et donc du nombre d'impacts. De façon générale, plus on développe les fibres, plus l'énergie consommée augmente, et plus la consistance diminue, plus le nombre d'impacts que reçoit la fibre diminue car les fibres passent plus vite au travers des plaques du raffineur, ce qui entraîne une augmentation de l'intensité.

Nous constatons que plus le nombre de stades augmente, plus l'intensité a tendance à diminuer dû à une répartition de l'énergie spécifique sur plus de stades donc plus de surface de raffinage. Cependant, pour le premier stade, la consistance utilisée étant plus haute due au raffinage pressurisé, l'intensité est généralement plus faible que pour les raffinages en deux ou trois stades, ce qui perturbe la tendance générale et rend plus complexe l'analyse de l'effet de l'intensité.

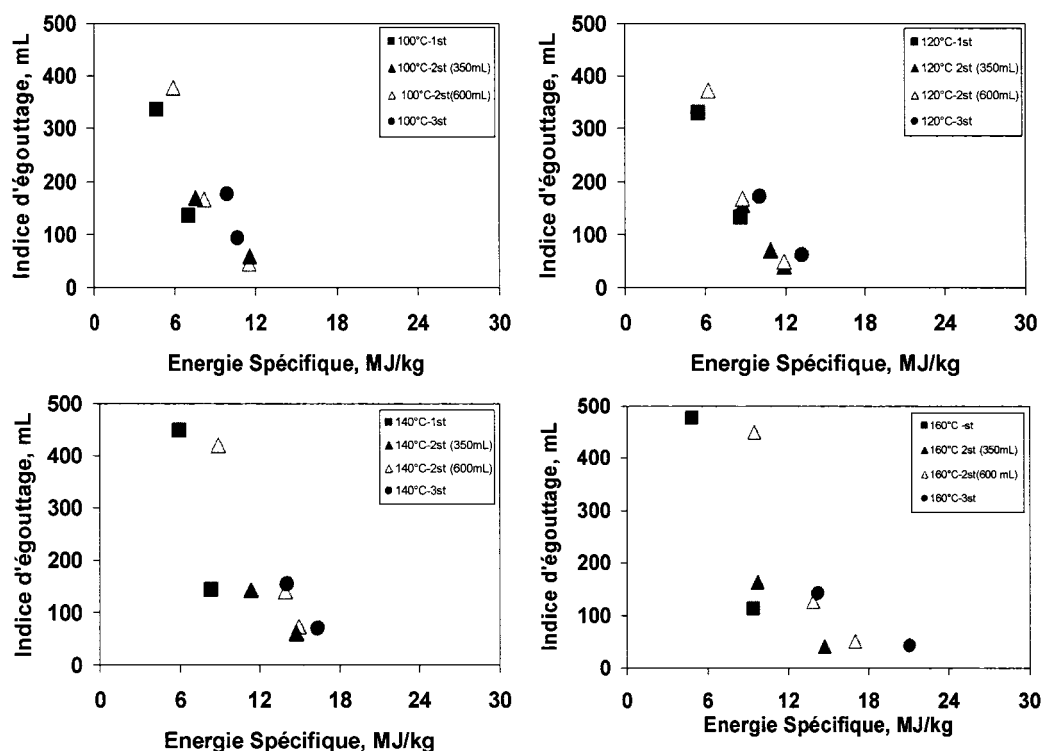
Remarquons que les pâtes raffinées en un stade ont une faible intensité de raffinage et prennent peu d'énergie. Cependant, nous verrons plus loin que les propriétés mécaniques sont peu développées, ce qui explique cette faible consommation énergétique. Lorsqu'on utilise 2 ou 3 stades, nous remarquons que la consommation d'énergie a tendance à augmenter à mesure que l'intensité diminue.

Selon Stationwala et al. [66], lorsqu'on applique l'énergie au premier étage, une augmentation de l'intensité tend à réduire l'énergie spécifique totale requise pour un CSF donné.

L'augmentation de la température a peu d'impact sur cette relation.



### 5.1.2 Consommation d'énergie spécifique



**Figure 5-2 Indice d'égouttage vs Énergie Spécifique**

La quantité d'énergie de raffinage nous renseigne sur les coûts en énergie reliés au traitement mécanique des fibres. La fibrillation, le raccourcissement et l'assouplissement des fibres nécessitent une certaine quantité d'énergie.

Aujourd'hui, on considère toujours que la consommation d'énergie spécifique (CES) est l'un des paramètres importants pour estimer la qualité des pâtes mécaniques. D'après la figure 5-2, l'augmentation de la consommation de l'énergie suit la diminution du CSF, ce qui représente un phénomène normal. En augmentant le nombre de stades, l'intensité de raffinage diminue, l'énergie consommée augmente, donc on voit ici que le raffinage en 3 stades prend plus d'énergie qu'en 1 ou 2 stades pour un CSF donné.

En augmentant la température, la distance entre les plaques diminue, lorsqu'on raffine la pâte en 1 ou 2 stades jusqu'à un CSF bas. On voit la même tendance pour la pâte raffinée

à 100°C et 120°C. Dans le cas du raffinage à température inférieure ou égale à 120°C, les fibres sont courtes mais la surface est riche en cellulose ce qui facilite un raffinage ultérieur. Cependant, lorsqu'on raffine en 2 stades à un CSF élevé (600 mL) ou en 3 stades à température 140 ou 160°C on voit une grosse augmentation d'énergie spécifique pour un CSF donné. Lors du raffinage à 140°C et à 160°C la lignine est ramollie. À la sortie du raffinage primaire, la lignine durcit à la surface de la fibre ce qui rend la pâte difficile à raffiner par la suite lors des stades subséquents sont effectués à pression atmosphérique. Donc l'augmentation du nombre de stades et la température ont un effet très important sur le raffinage.

La revue de littérature [32] nous permet de constater que le pin gris demande plus d'énergie spécifique de raffinage et possède de moins bonnes propriétés que l'épinette noire, à cause de son bois d'été qui présente une paroi épaisse des fibres et représente un plus grand volume par rapport au bois de printemps que dans le cas de l'épinette. De plus, il contient une plus haute teneur en matières extractibles. La consommation d'énergie dépend de plusieurs facteurs, dont l'essence, la dimensions des copeaux, les prétraitements thermique et chimique, la concentration de raffinage, le modèle de plaques et leur vitesse de rotation, le type et la dimension du raffineur et finalement, le type de pâte produit [12].

### **5.1.3 Taux de rejets**

Dans les pâtes PTM, il y a encore des amas de fibres ou des bûchettes plus ou moins développés qui influencent les liens inter-fibres dans la structure du papier. Ils peuvent aussi former des points faibles dans le réseau fibreux et, par conséquent, diminuer les propriétés physiques du papier. Nous espérons donc que le taux de rejets dans la pâte sera aussi petit que possible afin d'obtenir un papier plus résistant physiquement.

À la figure 5-3 nous remarquons une diminution du taux de rejet avec la diminution du CSF. Plus on applique d'énergie durant le raffinage, plus le CSF et l'entrefer utilisé diminuent, ce qui entraîne un taux de rejets plus faible.

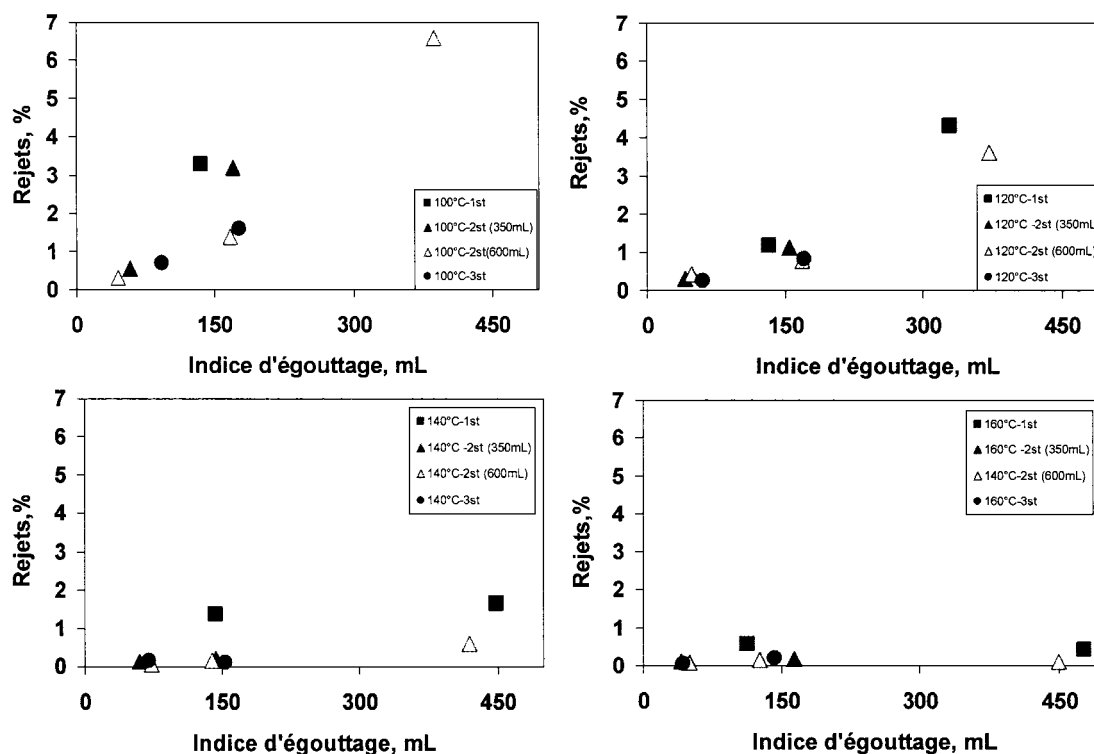
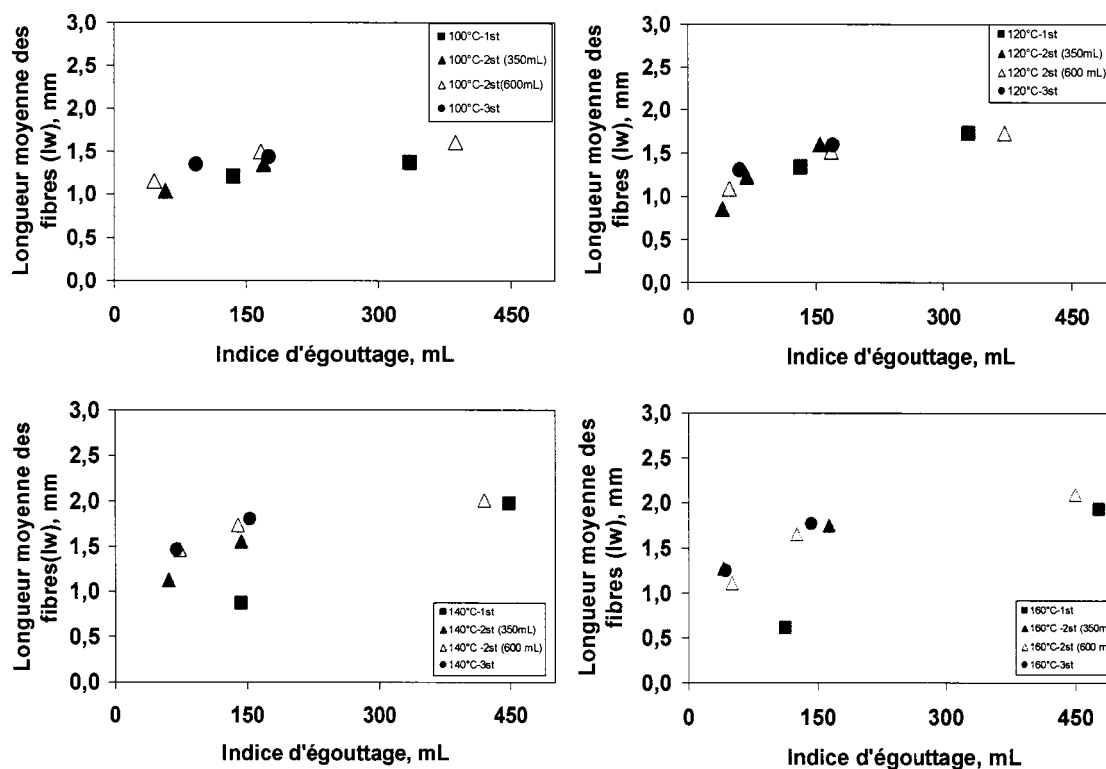


Figure 5-3. Taux de rejets vs CSF

L'augmentation du nombre de stades a un effet très important sur cette relation, car nous remarquons une diminution significative du taux de rejets lors du raffinage en 2 et 3 stades par rapport au raffinage en un seul stade pour un même CSF. Plus on raffine la pâte, plus on met d'énergie à plus faible intensité ce qui amène un taux de rejets plus faible lors du 2<sup>e</sup> et du 3<sup>e</sup> stade. Cependant, à haute intensité, peu d'énergie est appliquée. Cela entraîne un taux de rejets élevé lors du raffinage en un stade pour un même CSF, ce qui concorde bien avec les conclusions de Petit-Conil [67].

L'augmentation de la température a aussi un effet très significatif sur cette relation. On observe que le taux de rejets est plus faible à haute température, c'est à dire que le taux de rejets est plus faible pour la température à 140°C et 160°C pour un même CSF, alors que le taux de rejets est plus élevé à basse température (100°C et 120°C) pour un même CSF. Donc la haute température permet sans doute une meilleure séparation initiale des fibres, ce qui produit moins de bûchettes.

### 5.1.4 Longueur moyenne des fibres



**Figure 5-4. Longueur moyenne des fibres vs CSF**

La longueur des fibres est un facteur très important, car plusieurs propriétés physiques du papier en dépendent. La figure 5-4 représente la longueur moyenne des fibres en fonction du CSF. D'après cette figure, le nombre de stades a peu d'influence à basse température, c'est à dire à 100°C et à 120°C; plus on raffine la pâte, plus le CSF est bas, plus la longueur moyenne des fibres diminue. On voit ici qu'à une température de 100 ou 120°C, la tendance est presque semblable pour toutes les pâtes. Mais lorsqu'on raffine en un seul stade à 140°C et à 160°C, le faible entrefer requis cause une importante réduction de la longueur moyenne des fibres. Pour préserver la longueur des fibres, il semble donc préférable de rester à l'intérieur de limites acceptables en terme d'entrefer.

### 5.1.5 Études des caractéristiques des fractions

Tableau 5-1. Méthodes d'analyse des fractions.

Fractions	Essais Effectués
Fines	Volume Spécifique par sédimentation
Fibres courtes et moyennes (R100 + R200)	CSF sur la Fraction
Fibres longues et moyennes (R14, R28 et R48)	Potentiel de liaison Feuilles faites sur la fraction (R14 + R28) Analyse morphologique des fractions

Pour l'étude des caractéristiques des fractions, les essais à 120°C et à 160°C seulement ont été utilisés de façon à limiter le nombre de mesures. Les températures choisies correspondent aux températures les plus basses et les plus hautes de l'industrie.

#### 5.1.5.1 Fines

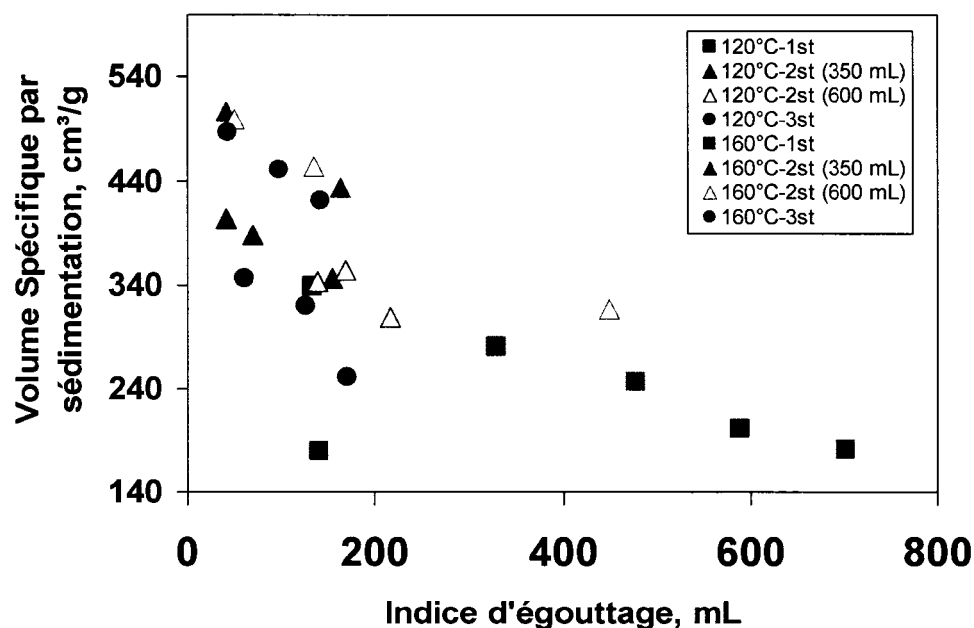


Figure 5-5. Indice d'égouttage vs Volume Spécifique par sédimentation

Les particules contenues dans la pâte pouvant passer au travers d'un tamis de 100 ou 200 mailles par pouce du classificateur Bauer-McNett ou d'un dispositif semblable sont

normalement définies comme les fines [68]. Ces fines sont un indice de qualité essentiel servant à estimer les propriétés des pâtes mécaniques.

Il y a deux sortes de fines dans les pâtes mécaniques: les fines primaires et les fines secondaires. Les fines primaires sont des particules floconneuses qui causent principalement le peluchage et la poussière. Elles apportent un grand coefficient de diffusion au papier. Elles proviennent de la couche externe de la fibre, soit la lamelle mitoyenne et la paroi primaire. Les fines secondaires sont plutôt fibrillées. Elles sont créées lors du raffinage et elles comportent des débris provenant de la paroi cellulaire  $S_2$  et jouent un rôle important au sein des propriétés de liaison.

La figure 5.5 nous montre volume spécifique par sédimentation en fonction du CSF. Le but de la sédimentation des fines est d'étudier leur potentiel de liaison. Le volume spécifique par sédimentation est utilisé pour évaluer la surface spécifique des fines. Plus les fines seront développées, plus le volume spécifique par sédimentation sera haut.

Nous remarquons qu'à 160°C, les fines sont mieux développées par rapport à 120°C.

Pour la pâte en un stade à 160°C, on brise trop de fibres dû au faible entrefer requis, donc le développement de ces fines est moindre.

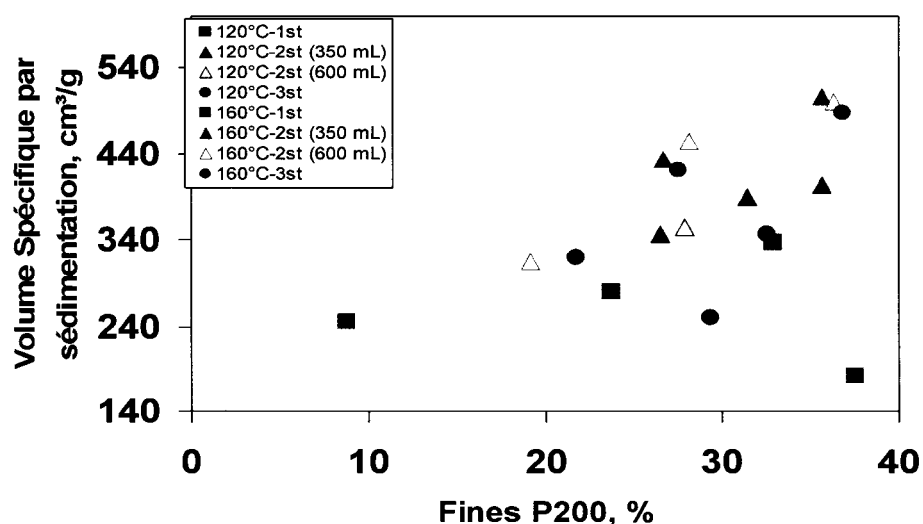


Figure 5-6. Volume Spécifique par sédimentation vs Fines P200

La figure 5.6 nous montre la relation entre le volume spécifique par sédimentation et les fines P200. La production de fines et la qualité de ces fines ont certainement un impact important sur la qualité finale de la pâte. Nous remarquons une augmentation du volume spécifique par sédimentation avec l'augmentation de la quantité des fines P200. Plus la quantité de fine augmente, plus le volume spécifique par sédimentation sera haut.

Nous constatons que la quantité de fines pour la pâte 120°C et 160°C est presque identique, mais que pour une même quantité de 30% de Fines P200, le volume spécifique par sédimentation des pâtes à 160 °C est plus élevé que pour celles à 120°C; à cause de la qualité des fines qui diffère. Donc la qualité des fines joue un rôle très important sur cette relation. Dans ce cas nous présumons que la haute température change la composition des fines. Il y a possiblement plus d'éléments fibrillaires à haute température, ce qui explique la plus grande surface spécifique.

#### 5.1.5.2 Fibres courtes et moyennes

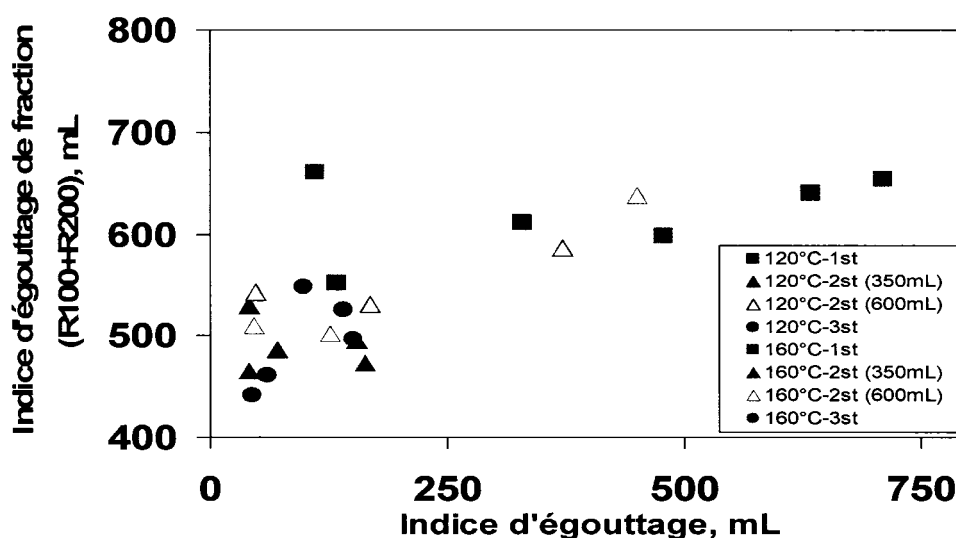


Figure 5-7. CSF de la fraction (R100 + R200) vs CSF

La figure 5-7 nous montre la relation entre le CSF de la fraction R100 + R200 et le CSF de la pâte entière. Pour la fraction R100 + R200 du Bauer MacNett, soit les fibres moyennes et courtes, nous avons utilisé la mesure de l'indice d'égouttage sur cette frac-

tion pour suivre son développement. Forgacs, dans les années 60 pour la pâte de meule a développé deux indices de qualité, L et S; L étant la quantité de fibres longues et S la surface spécifique des fibres courtes estimée par un CSF sur la fraction R100. Nous sommes partis du même principe pour évaluer la surface spécifique de la fraction R100 + R200. Plus ce CSF est bas, plus la fraction est développée ou fibrillée.

Le nombre de stades semble avoir un impact surtout à bas CSF. Un raffinage à 160°C en 1 stade ne permet pas un meilleur développement et entraîne même un important problème de développement des fibres à bas CSF. Pour le 2<sup>e</sup> et le 3<sup>e</sup> stade de raffinage, on voit un comportement assez semblable. Par contre, remarquons que les pâtes à 160°C en 2 stades à bas CSF et en 3 stades sont mieux développés.

Pour 2 ou 3 stades, l'effet de la température est faible.

### 5.1.5.3 Fibres longues

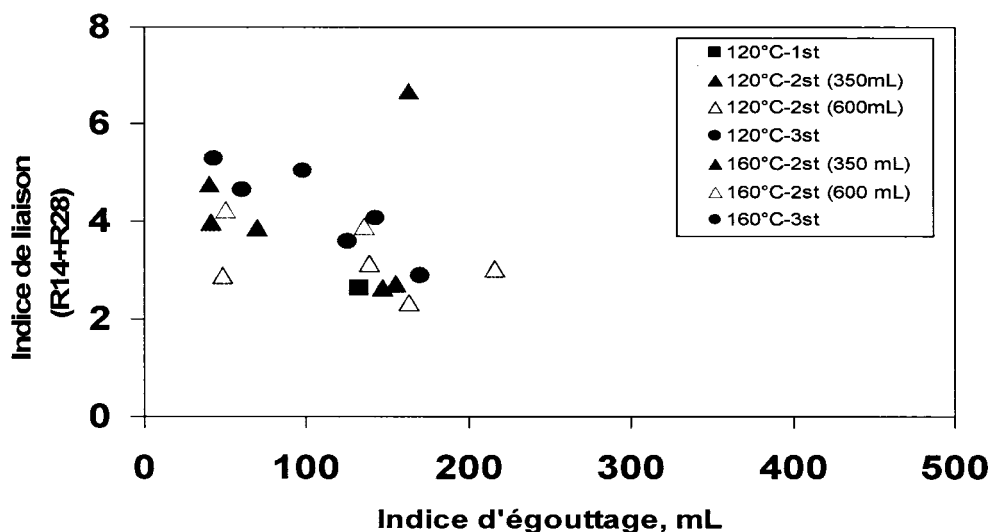


Figure 5-8. Potentiel de liaison vs CSF

La figure 5-8 nous montre la relation entre le potentiel de liaison et le CSF. Le potentiel de liaison est utilisé couramment pour évaluer le développement des fibres longues de la pâte thermomécanique. Cependant dans la majorité des cas, ce test est fait sur une pâte

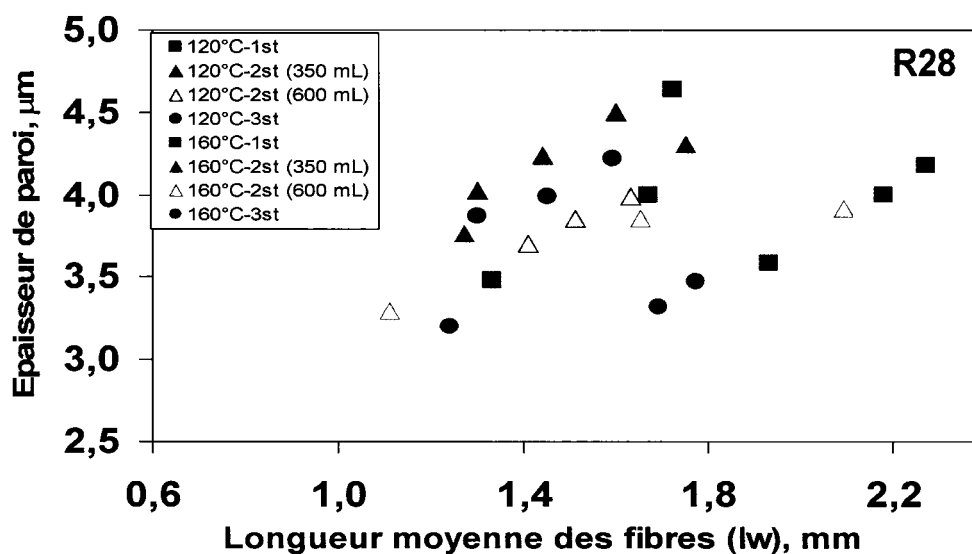


finale, donc à un CSF assez bas. L'utilisation pour toutes nos pâtes a été impossible car les feuilles fabriquées de fibres longues seulement sont impossibles à former pour les CSF de plus de 200 mL, ce qui nous a fait perdre plusieurs points sur nos graphiques.

On voit que le raffinage développe les fibres longues donc leur potentiel de liaison, donc plus le CSF est bas, plus la pâte est développée.

En augmentant le nombre de stades, l'indice de liaison devient plus important, donc l'intensité joue un rôle très important sur cette relation. Plus on raffine la pâte, plus on développe la surface des fibres, plus les fibres sont fibrillées et plus les forces de liaison entre les fibres sont fortes.

L'augmentation de la température a aussi un effet important sur cette relation car la température ramollit la lignine, aplatit la fibre, permet une plus grande délamination de la surface de la fibre, ce qui entraîne une augmentation de liaison entre les fibres car la paroi secondaire est découverte.

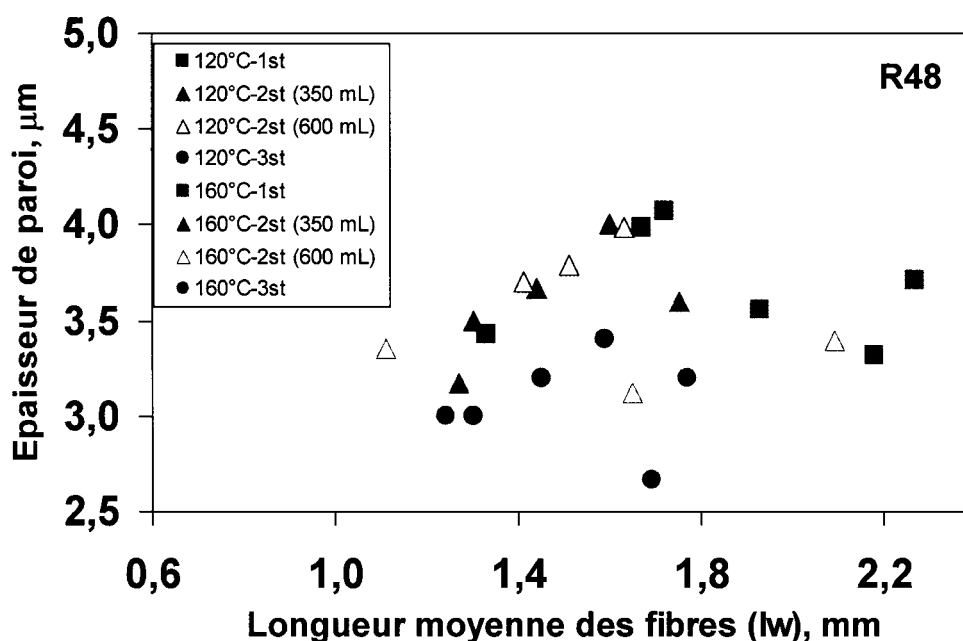


**Figure 5-9. Épaisseur de paroi cellulaire vs longueur moyenne de fibre (R28)**

La figure 5-9 nous montre la relation entre l'épaisseur de paroi et la longueur moyenne des fibres pour la fraction R28. Avec ce graphique, on peut comparer le défibrage initial

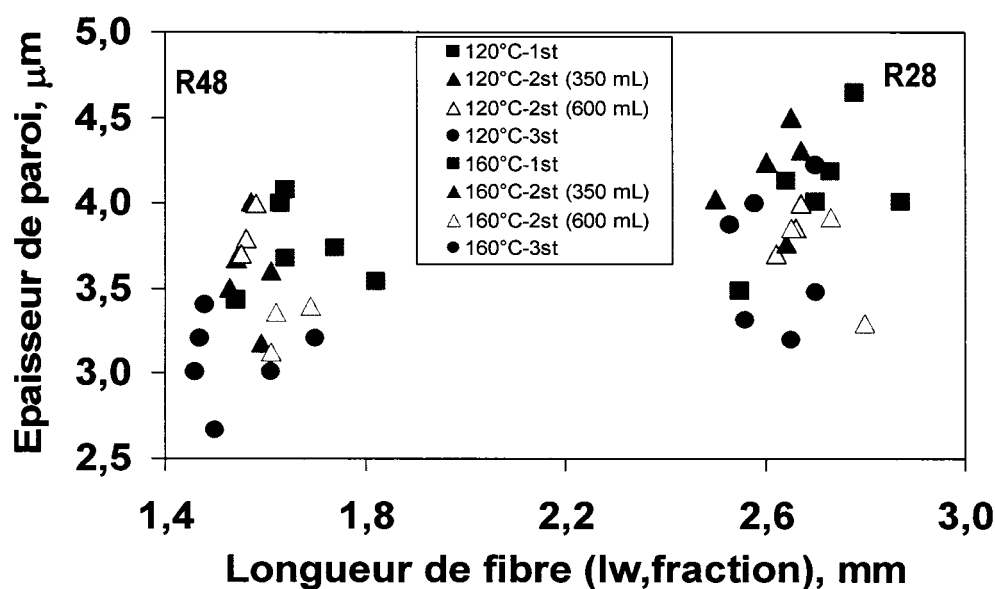
de la pâte à basse et haute températures. Pour la pâte à 120°C, la fibre est plus courte et plus épaisse, mais lorsqu'on raffine la pâte à 160°C, il semble que l'on produise une meilleure séparation initiale et une délamination partielle de la paroi.

On remarque aussi que la pente de l'épaisseur de paroi en fonction de la longueur moyenne des fibres est plus prononcée et plus régulière pour le raffinage à 120°C. Le raffinage à 160°C semble moins uniforme et le raccourcissement des fibres est plus rapide qu'à 120°C par rapport à la réduction d'épaisseur de paroi.



**Figure 5-10. Épaisseur de paroi cellulaire vs longueur moyenne des fibres (R48)**

C'est la même chose pour les fractions R48, mais nous remarquons ici que les fibres sont plus courtes, et que la pente est plus faible par rapport à R28 lorsque le raffinage est fait à haute température.



**Figure 5-11. Épaisseur de paroi cellulaire vs longueur moyenne des fibres des fractions R28 et R48**

Figure 5-11 nous montre la relation entre l'épaisseur des parois et la longueur moyenne des fibres des fractions R28 et R48. La représentation en termes de longueur moyenne des fibres de chaque fraction apporte également un comportement spécial de la pâte dans le Bauer McNett. La séparation de fibre est important ici. Plus la fibre est flexible, plus il y a de chance qu'elle passe au travers du tamis. À 120°C, la longueur des fibres dans la fraction R48 s'étend de 1,45 à 1,6 millimètres tandis qu'elle est de 1,5 à 1,85 millimètres pour les pâtes à 160°C. Ainsi, une partie des fibres R28 à 160°C a traversé le tamis de R28 et qui se trouvent parmi le R48 à cause de leur flexibilité. Pour les fibres plus longues (R28 dans le graphique), la longueur de fibre s'étend principalement entre 2,5 et 2,8 millimètres pour les deux températures. Quand la longueur de fibre est réduite, nous avons vu que l'épaisseur de paroi est également réduite, cela entraîne une augmentation de leur flexibilité. Donc, la haute température mène à des fibres plus flexibles que la basse température.

## 5.2 Propriétés du papier

### 5.2.1 Propriétés physiques du papier

Dans cette partie, nous utilisons la densité, l'indice de rupture, le TEA, l'indice d'éclatement, et l'indice de la déchirure pour analyser les propriétés physiques du papier. L'effet du raffinage sur les propriétés pourra donc être révélée.

#### 5.2.1.1 Bouffant

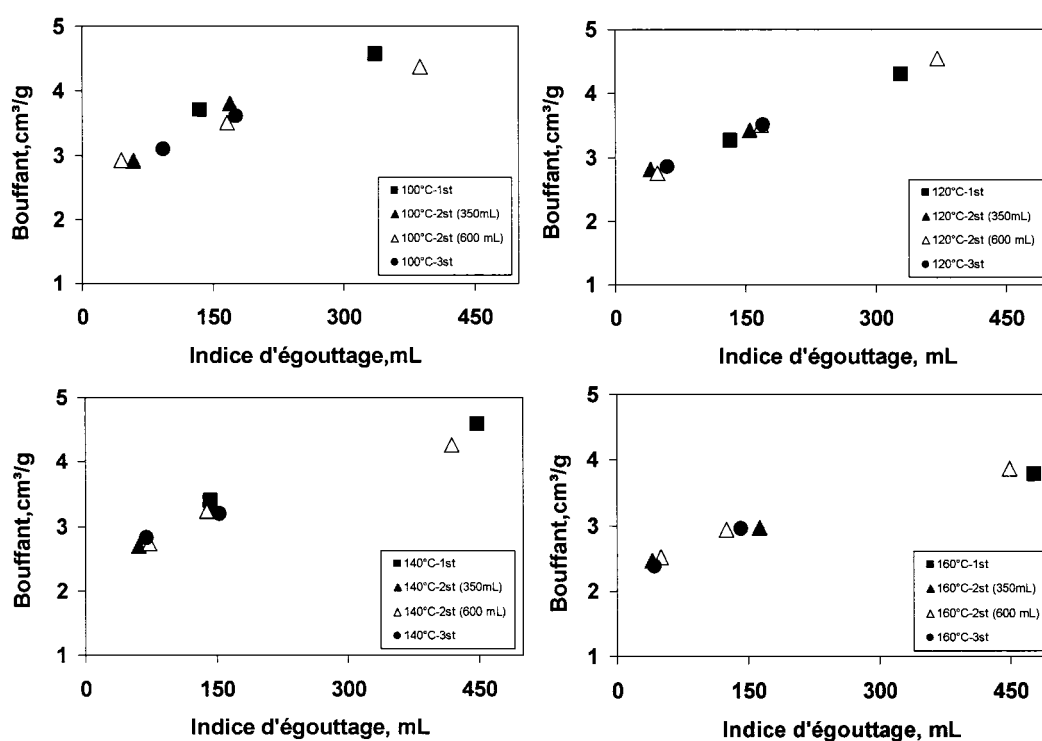


Figure 5-12. Bouffant vs CSF

Plus la fibre est souple et apte à un affaissement, plus les vides de structure du papier seront minimisés et donc le bouffant diminuera avec la souplesse de la fibre [68].

Le bouffant est plus grand pour les pâtes de pin gris (PTM, PCTM) que pour les pâtes d'épinette. Si les fibres sont plus flexibles, le bouffant devrait diminuer [60].

D'après la figure 5-12, nous remarquons la diminution de bouffant avec la diminution d'indice d'égouttage. Car plus on raffine la pâte, plus l'énergie spécifique augmente, plus on développe la surface des fibres, plus les fibres sont flexibles, ce qui entraîne la diminution du bouffant. L'augmentation du nombre de stade a peu d'impact sur cette relation. En effet, pour tous les raffinages à 100°C et à 120°C, on voit la même valeur du bouffant environ  $3,5 \text{ cm}^3/\text{g}$  pour un même CSF.

Cependant, lorsqu'on augmente la température, c'est-à-dire, lorsqu'on raffine en 2 ou 3 stades à 160°C, on voit une diminution drastique du bouffant à environ  $2,38 \text{ cm}^3/\text{g}$  pour un même CSF. Donc le raffinage à haute température rend la fibre plus flexible et plus fibrillée et diminue le bouffant.

### 5.2.1.2 Indice de rupture

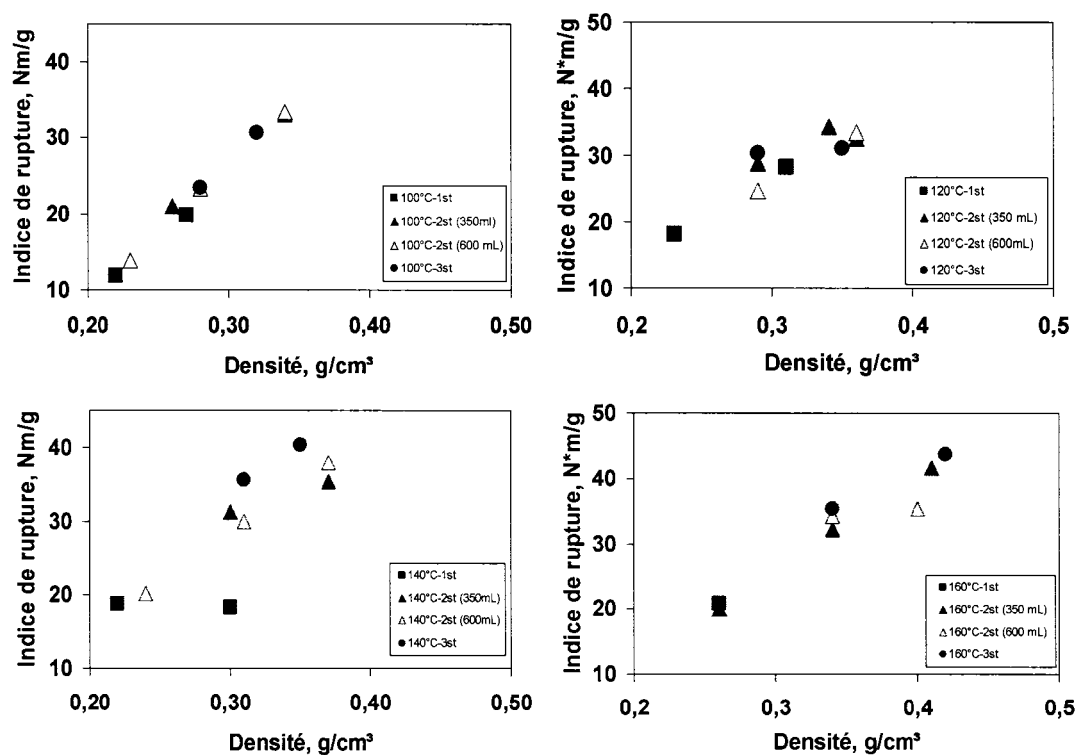


Figure 5-13. Indice de Rupture vs Densité

La figure 5-13 nous montrent l'indice de rupture en fonction de la densité. L'augmentation de l'indice de rupture en fonction de la densité suit la même courbe générale, donc le développement des fibres lors du raffinage suit une même tendance.

Nous constatons aussi que l'augmentation du nombre de stades a peu d'impact à 100°C et 120°C; mais que le raffinage en 2 ou 3 stades à haute température (140°C et 160°C) permet d'atteindre une densité plus élevée et une longueur de rupture plus élevée, parce que le raffinage en 2 ou 3 stades à haute température provoque le détachement de la paroi cellulaire, la réduction de la masse linéique des fibres, l'apparition de fines, la fibrillation, ainsi que l'augmentation des liens entre les fibres, ce qui entraînent une augmentation de la densité du papier qui est aussi favorable à une augmentation de l'indice de rupture.

La revue de littérature [69, 70] nous montre que la fibrillation et la flexibilité des fibres sont favorables à la formation des liaisons entre les fibres. Lors du raffinage, les fibrilles formées augmentent la surface de liaison disponible entre les fibres et la résistance en tension des feuilles des pâtes raffinées augmente en raison de l'augmentation de la surface de contact entre les fibres.

### **5.2.1.3 Absorption d'énergie à la rupture**

La figure 5-14 montre une augmentation de l'absorption d'énergie à la rupture en fonction du CSF. Plus on raffine la pâte, plus le CSF est bas, plus on développe la surface des fibres, plus on produit de fines, plus les liens entre les fibres augmentent, ce qui provoque l'augmentation d'absorption d'énergie à la rupture.

Nous remarquons que la tendance est presque semblable pour toutes les pâtes raffinées à 100°C et à 120°C. Nous constatons aussi que l'augmentation du nombre de stades a peu d'impact pour le raffinage à 100°C et à 120°C. Cependant, lorsqu'on raffine la pâte à haute température (140°C et 160°C) en premier stade, suivi d'un raffinage en 2 ou 3 stades atmosphérique, nous observons l'élévation de l'absorption d'énergie de rupture pour un même CSF. Pour les pâtes raffinées en 1<sup>er</sup> stade à haute température, on constate que

le faible entrefer cause ici aussi un développement des fibres moindre, donc son AER est faible.

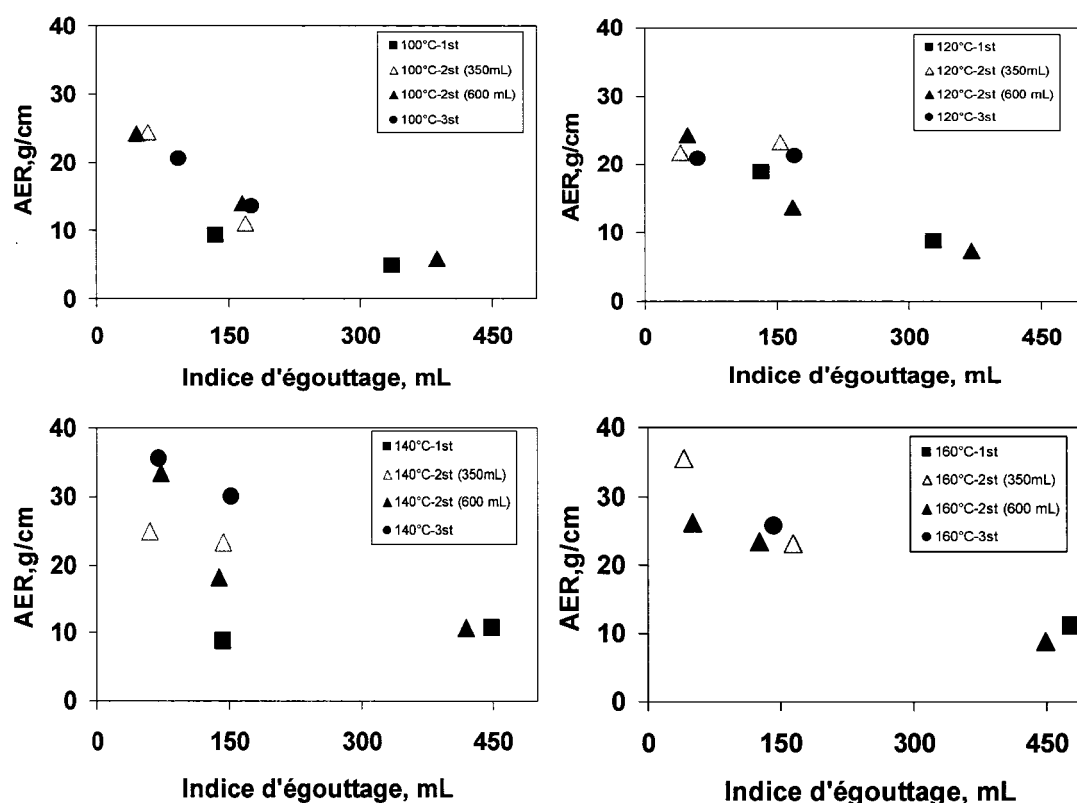


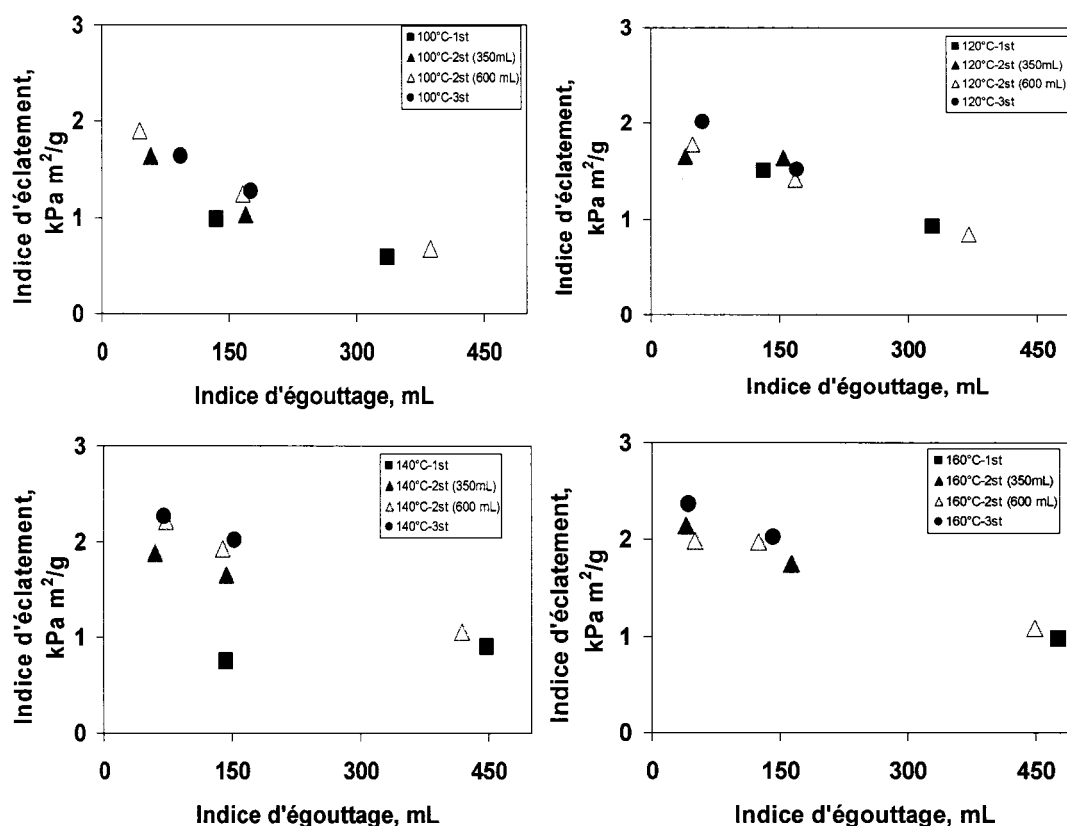
Figure 5-14. AER vs Indice d'égouttage

#### 5.2.1.4 Indice d'éclatement

Selon la figure 5-15, l'augmentation de l'indice d'éclatement avec la diminution du CSF suit la même courbe générale. Normalement, l'indice d'éclatement dépend de la longueur des fibres et des liaisons inter fibres. Plus on raffine la pâte, plus le CSF est bas, plus les fibres sont fibrillées, plus les liens entre les fibres augmentent, ce qui implique l'augmentation de l'indice d'éclatement.

L'augmentation du nombre de stades a peu d'impact lors du raffinage à 100°C et 120°C. Nous remarquons, pour tous les raffinages à 100 et 120°C, que l'indice d'éclatement est égal à environ 1,4 kPa m<sup>2</sup>/g pour un même CSF d'environ 150mL. Giertz et al. [71]

mentionnent que la qualité de la pâte reste la même quand la température de raffinage et d'étuvage passe de 125 à 145°C, ce qui est cohérent avec cette étude.



**Figure 5-15. Indice d'éclatement vs Indice d'égouttage**

Lorsqu'on augmente la température, on obtient un indice d'éclatement plus élevé d'environ 1,8 kPa m²/g pour un même CSF de 150mL, lors du raffinage en 2 ou 3 stades à 140°C et 160°C.

Donc la haute température rend la fibre plus flexible et plus développée, augmente les liens entre les fibres, ce qui entraîne une augmentation de l'indice d'éclatement pour un même CSF. Le volume spécifique décroît avec la température pour un CSF constant, puisque l'énergie de raffinage requise est plus appréciable à haute température, ce qui donne lieu à la production de fibres plus flexibles [8].



### 5.2.1.5 Indice de déchirure

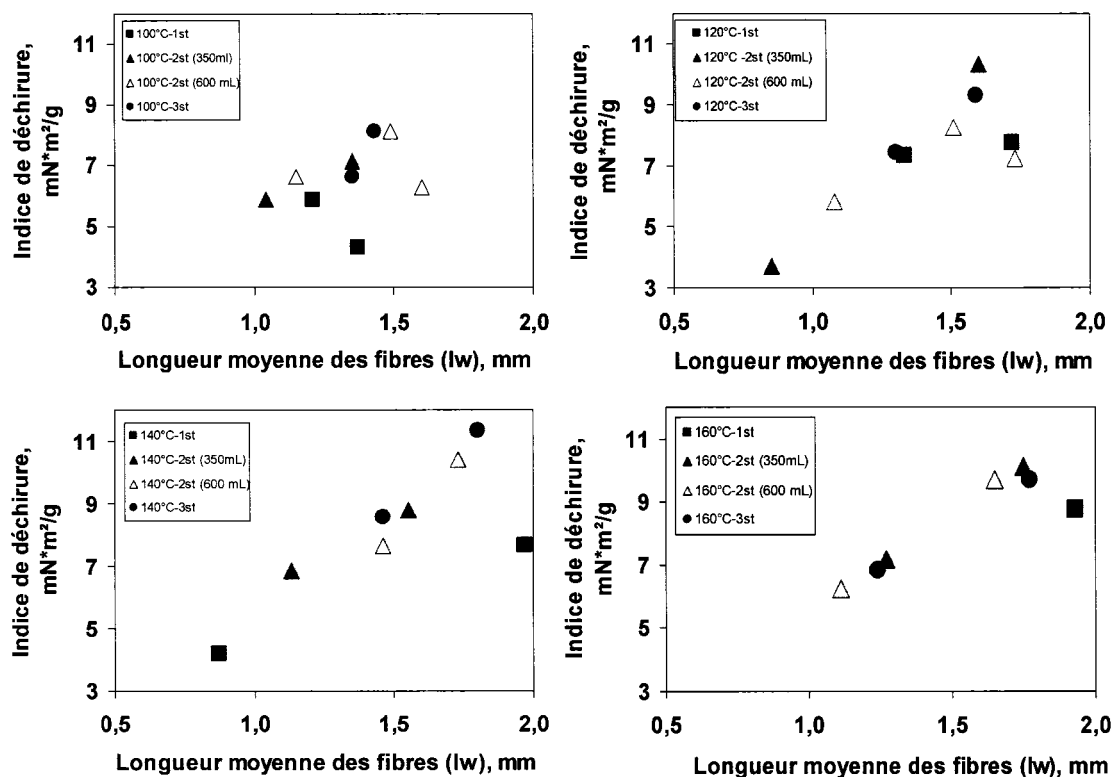


Figure 5-16. Indice de déchirure vs Longueur moyenne des fibres

Selon la figure 5-16, l'indice de déchirure augmente avec l'augmentation de la longueur moyenne des fibres. L'indice de déchirure dépend principalement de la longueur des fibres mais est aussi fortement affecté par les liaisons fibre-fibre.

Nous remarquons que pour le raffinage en 2 stades à bas CSF ou en 3 stades à 100°C, l'indice de déchirure est faible, environ  $8,11 mN \cdot m^2/g$  à 1,43 mm de longueur moyenne des fibres, parce que le développement des fibres est moindre et que la cohésion entre les fibres est faible à 100°C. Cela entraîne un faible indice de déchirure à basse température (à 100°C). Cependant, lorsqu'on raffine la pâte en 2 ou 3 stades à 120°C -160°C, on voit bien l'élévation de l'indice de déchirure d'environ 9,3 à  $10,3 mN \cdot m^2/g$  à (1,6 - 1,75 mm) de longueur moyenne des fibres. Donc le raffinage à haute température permet de mieux séparer les fibres en préservant leur longueur et en développant aussi leur potentiel de

liaison, ce qui provoque une augmentation de l'indice de déchirure. Toutefois, lorsque l'on continue le raffinage pour avoir un CSF plus bas, on prend beaucoup d'énergie, on brise trop de fibres, ce qui provoque la diminution de la longueur des fibres et donc la diminution de l'indice de déchirure, d'où la diminution de l'indice de déchirure pour le raffinage en 2 stades à partir de la pâte de premier stade à 600mL. Le raffinage en 1 stade ne permet pas un meilleur développement des fibres, d'où la faible indice de déchirure.

La revue de littérature [72, 73] nous mentionnent que : Les fibres d'une pâte non raffinée sont d'une cohésion faible, ce qui entraîne aussi une faible résistance à la déchirure [74]. Lorsqu'on raffine la pâte, les liaisons fibrillaires augmentent et donc les forces de cohésion entre les fibres, ce qui favorise la résistance à la déchirure [73]. Lors du raffinage, la densité de la pâte augmente, la cohésion entre les fibres aussi, ce qui est favorable à une augmentation de la résistance à la déchirure jusqu'à une valeur maximale. L'augmentation des forces de raffinage entraîne aussi la diminution de la longueur des fibres et donc la diminution de la résistance à la déchirure [73].

## **5.2.2 Propriétés optiques du papier**

Dans cette partie, nous examinerons les propriétés optiques comprenant la blancheur, l'opacité et le coefficient de diffusion de la lumière.

### **5.2.2.1 Blancheur**

La blancheur est l'une des propriétés optiques les plus importantes pour la pâte. Elle est déterminée lorsque le papier est placé sous une lumière bleue à 457 nanomètres. La blancheur dépend principalement de la nature des fibres et de la couleur naturelle des essences. La revue littérature indique que lorsque les pâtes subissent plusieurs passes successives à travers les disques du raffineur, une contamination par les ions métalliques des disques peut devenir néfaste pour la blancheur [74].

Selon la figure 5-17, une augmentation de la blancheur suit la diminution de CSF. Ce phénomène est dû principalement au développement de la surface spécifique des fibres qui crée une augmentation du coefficient de diffusion de la lumière. Cela explique aussi

pourquoi une température de 120°C donne une blancheur supérieure à 100°C même si la tendance générale est une baisse de blancheur en fonction de la température. L'augmentation du nombre de stades a peu d'impact sur cette relation. Cependant, nous constatons une diminution de la blancheur lors du raffinage à 160°C, autrement dit, la haute température provoque une réversion de blancheur à cause des groupements chromophores contenus dans la lignine. Selon Franzen et Li [75], un temps de résidence élevé à l'intérieur du lessiveur de même que de fortes températures ont abaissé le paramètre de blancheur des pâtes.

En usine, par exemple pour le procédé RTS, la haute température est associée à un très court temps afin de ralentir cet effet de noircissement.

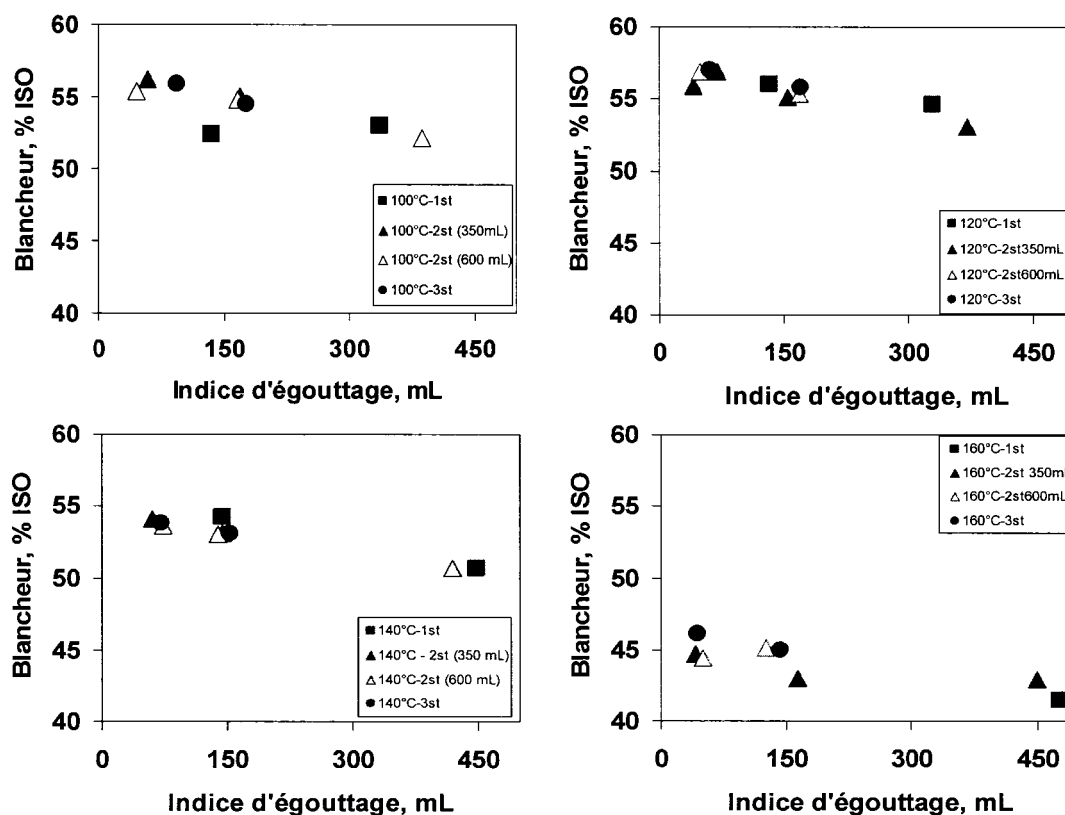
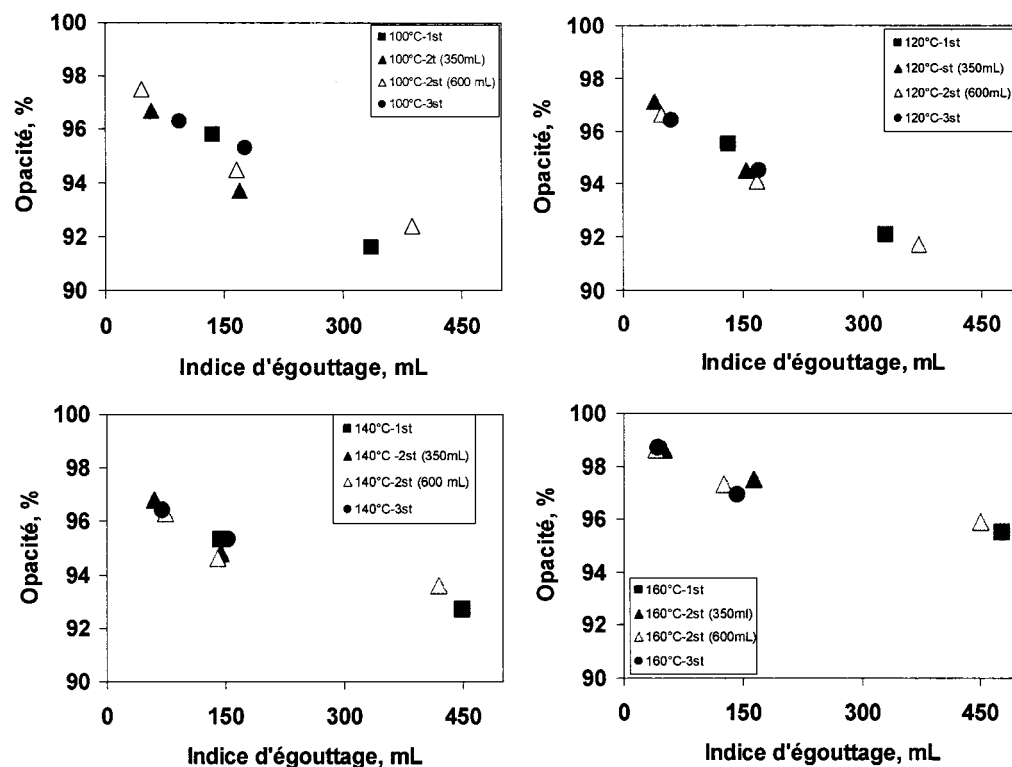


Figure 5-17. Blancheur vs Indice d'égouttage

### 5.2.2.2 Opacité

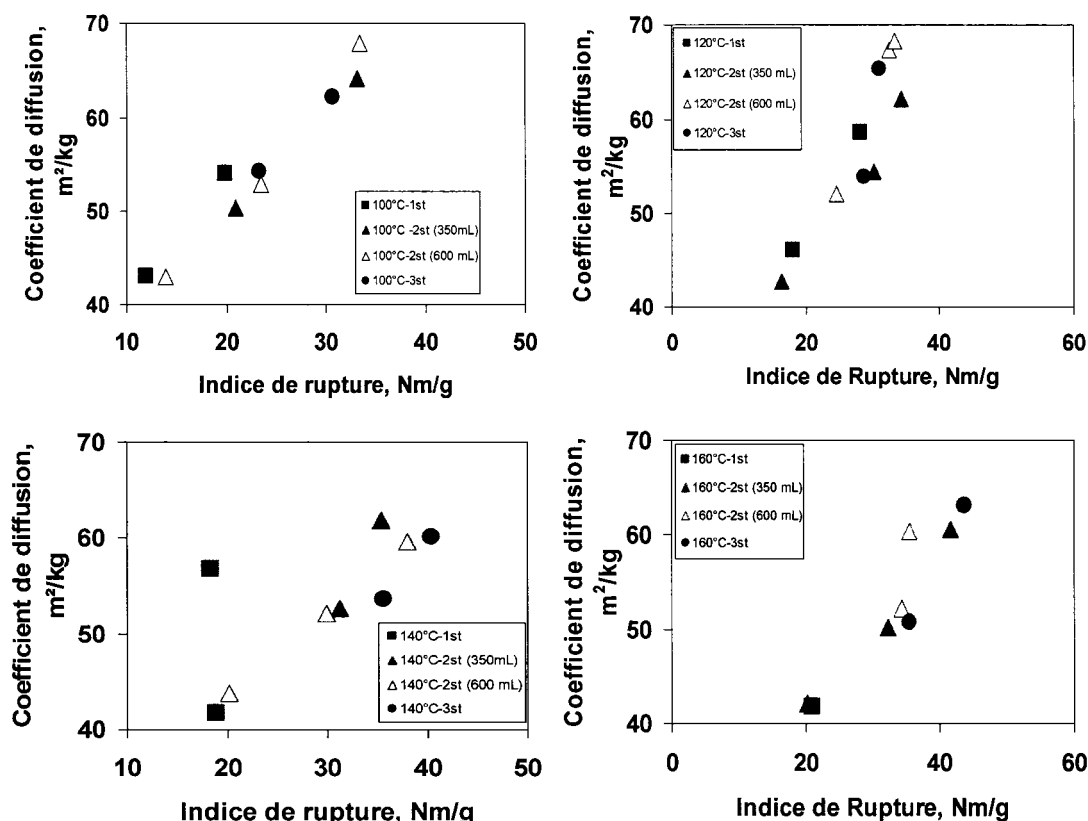


**Figure 5-18. Opacité vs Indice d'égouttage**

L'opacité d'une feuille de papier consiste à mesurer jusqu'à quel degré cette feuille empêche le passage de la lumière. L'opacité est influencée par le nombre d'interfaces air-fibres et par la couleur de la pâte.

À la figure 5-18, nous observons une augmentation de l'opacité avec la diminution du CSF. L'augmentation du nombre de stades a peu d'impact sur cette relation. Mais lorsqu'on augmente la température à 160°C, on voit l'opacité un peu plus élevée pour un même CSF. À cette température, la séparation des fibres se fait différemment. Nous avons vu que les fines produites ont une grande surface spécifique, ce qui explique certainement ce comportement.

### 5.2.2.3 Coefficient de diffusion de la lumière

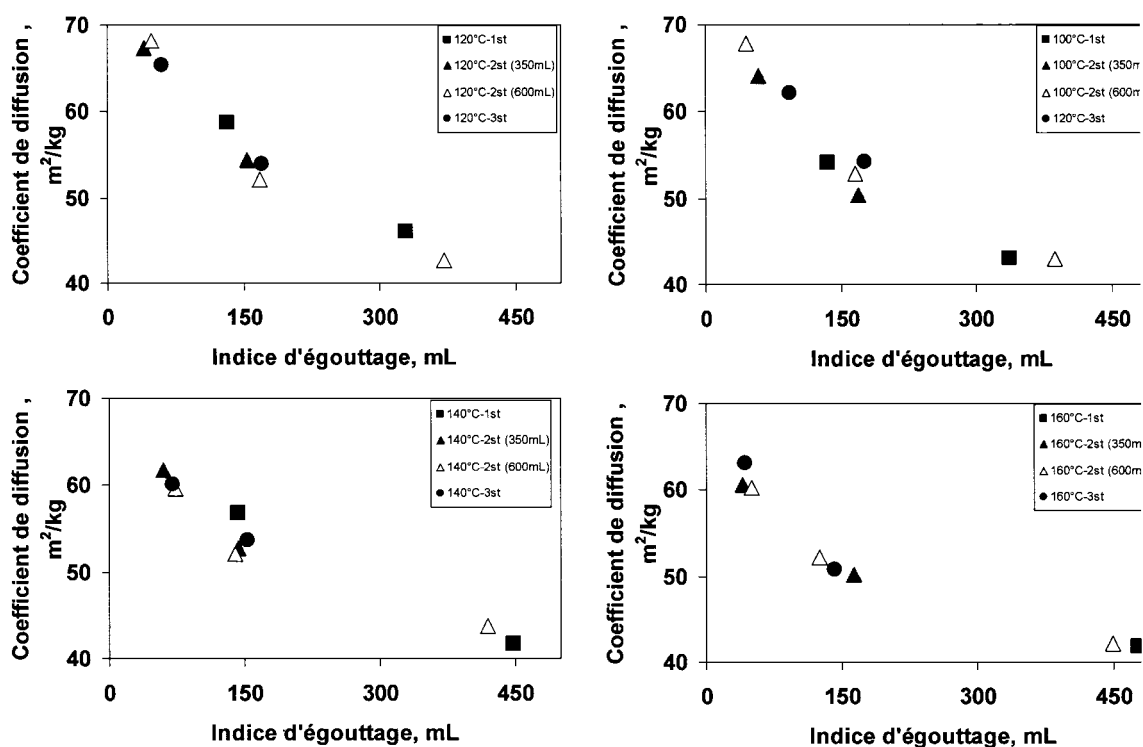


**Figure 5-19. Coefficient de diffusion de la lumière vs Indice de rupture**

La diffusion de la lumière de la pâte augmente comme conséquence d'un nombre élevé d'interfaces entre différents matériaux (fibres et particules de la pâte) ou également d'interfaces avec l'air [76]. Le nombre d'interfaces s'élève avec la diminution de la taille des particules, dont les fines, qui entrent dans la constitution d'une feuille de pâte; la taille optimale de ces particules est 0,5µm [76]. Le coefficient de diffusion de la lumière est influencé non seulement par la quantité de bûchettes mais aussi par la qualité des particules fines.

À partir de la figure 5-19 on remarque que le coefficient de diffusion de la lumière se développe avec l'augmentation de l'indice de rupture. Parce que, durant le raffinage, on développe la surface de fibre, les liens entre les fibres augmentent, donc le coefficient de diffusion et l'indice de rupture augmentent.

Le nombre de stades a peu d'impact sur cette relation. Mais on remarque qu'en augmentant la température à 140°C et 160°C, le coefficient de diffusion diminue, car la température ramollit la lignine, la fibre se brise différemment et produit des fines plus fibrillaires que floconneuse. Donc la nature des fines est la cause principale de ce comportement.



**Figure 5-20. Coefficient de diffusion de la lumière vs CSF**

Selon la figure 5-20, on constate une augmentation du coefficient de diffusion avec la diminution du CSF, car lorsqu'on raffine la pâte à CSF plus bas, on développe la surface des fibres, donc on produit beaucoup des fines ce qui favorise l'augmentation du coefficient de diffusion de la lumière.

Le nombre de stades a peu d'impact sur cette relation. Mais lorsqu'on augmente la température à 140°C et à 160°C, on voit ici aussi la diminution du coefficient de diffusion suivant la même tendance qu'on observe à la figure précédente.

## Chapitre 6 - Conclusions

Les résultats obtenus de cette étude augmentent le niveau des connaissances de l'information existante, particulièrement sur le développement des diverses fractions de fibres lors du raffinage. Les résultats de ce travail ont permis de mieux comprendre le comportement d'une pâte à haut rendement de pin gris étudié face aux deux paramètres de raffinage, la température et le nombre de stades, et donc de rendre possible une meilleure utilisation de cette matière première dans l'industrie papetière.

Les résultats montrent qu'en augmentant le nombre de stades, la consommation d'énergie est plus élevée, l'intensité diminue, le taux de rejets diminue, la surface spécifique des fines augmente, les fibres moyennes/courtes ainsi que les fibres longues sont mieux développées et la résistance du papier augmente pour un même CSF. L'augmentation du nombre de stades a peu d'impact sur les propriétés optiques (blancheur, opacité, coefficient de la lumière) du papier pour un même CSF.

Les résultats montrent qu'en augmentant la température, la consommation d'énergie augmente, le taux de rejets diminue, la surface spécifique des fines augmente, les fibres moyennes/courtes sont peu influencées, les fibres longues sont plus fibrillées, la résistance du papier augmente et les propriétés optiques du papier (blancheur, opacité, coefficient de diffusion de la lumière) diminuent pour un même CSF. Il serait possible de contrôler la perte de blancheur en réduisant le temps à haute température.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées des résultats des études du comportement de la fraction [Fines (VSS) ; Fibres courtes et moyennes (CSF sur la fraction) ; Fibres longues et moyennes (Potentiel de liaison, feuilles faites sur la fraction (R14 + R28) et analyse morphologique des fractions]:

- Pour les fines, les résultats montrent que : pour le raffinage à 160°C, les fines sont mieux développées par rapport à 120°C. De plus, pour une même quantité de 30% de Fines P200, le volume spécifique par sédimentation des pâtes à 160 °C est plus élevé que pour celles à 120°C; à cause de la qualité des fines qui

diffère. Donc la qualité des fines joue un rôle très important sur la relation VSS vs P200. Dans ce cas nous présumons que la haute température change la composition des fines.

- Pour les fibres courtes et moyennes : Les résultats montrent que le nombre de stades semble avoir un impact surtout à bas CSF. Un raffinage à 160°C en 1 stade ne permet pas un meilleur développement et entraîne même un important problème de développement des fibres à bas CSF. Pour les raffinages en 2 et 3 stades, on voit un comportement assez semblable. Par contre, nous remarquons que les pâtes à 160°C en 2 stades à bas CSF et en 3 stades sont mieux développées. Pour 2 ou 3 stades, l'effet de la température est faible.
- Pour les fibres longues et moyennes :
  1. Nous remarquons que : le raffinage développe les fibres longues donc leur potentiel de liaison. En augmentant le nombre de stades, l'indice de liaison devient plus important, donc l'intensité joue un rôle très important sur la relation du potentiel de liaison en fonction du CSF.
  2. Pour l'étude de la morphologie des fibres : les résultats montrent que quand la longueur des fibres est réduite. Nous avons vu que l'épaisseur de la paroi cellulaire est également réduite, ce qui entraîne une augmentation de leur flexibilité.

Donc en générale, les résultats des études du comportement des fractions nous montrent le développement des fibres pour chaque fraction, donc des changements dans les propriétés du papier obtenu en tenant compte du coût énergétique du raffinage. À partir de cette information, nous pouvons évaluer le niveau de raffinage requis par les copeaux de pin gris pour avoir une bonne qualité de pâte à papier par rapport à l'épinette noire, mais avec une consommation d'énergie tolérable. Avec cet outil, nous pourrions mieux contrôler l'effet du pin gris pour ainsi accroître son utilisation.

Les résultats nous permettent de conclure que le raffinage à haute température (160°C) au premier stade jusqu'à un CSF de 350 mL, suivi d'un raffinage de haute ou à basse température en deuxième stade atmosphérique jusqu'au CSF désiré semble préférable



pour obtenir une énergie acceptable, d'excellentes propriétés de toutes les fractions et pour augmenter les propriétés finales du papier et ainsi permettre une augmentation du taux d'utilisation du pin gris dans le domaine papetier.

Pendant le travail, nous n'avons pas examiné l'effet de la haute teneur en matières extractibles du pin gris qui cause des problèmes de poix sur les machines à papier. Cette étude serait probablement d'un certain intérêt pour un prochain travail pour pouvoir augmenter le taux d'utilisation du pin gris dans le domaine papetier.

## Bibliographie

- 1 Mackey, A., Ehrlich, A., Murphy, D. and McLaren, H., "Pulp and Paper North American Factbook: Canada", PPI-Miller Freeman Pub., San Francisco, USA, pp.85-126 (2000).
- 2 Direction du développement de l'industrie des produits forestiers, Secteur des forêts <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/Coraffin.pdf>
- 3 <http://www.webctp.com/ctp/fr/ressources/faq.cfm?idTheme=17&idFiche=114>
- 4 Association canadienne des pâtes et papiers, "Tables de statistique", Montréal, Canada, pp. 19-41 (1999).
- 5 Barbe, M., Jancknecht, S., Rémillard, B. and Lapointe, M., "Properties of Mechanical and Chemimechanical Jack Pine (*Pinus banksiana*), Part III : Interstage", Proc. Pulping Conf., TAPPI, Seattle, pp. 117-129 (1989a).
- 6 Le monde Forestier, [www.lemondeforestier.ca](http://www.lemondeforestier.ca) , Vol.20, pages 2-40 Mars 2006.
- 7 [http://www.afocel.fr/Foret/Essais/Epicea/Industrie\\_papetiere.htm](http://www.afocel.fr/Foret/Essais/Epicea/Industrie_papetiere.htm)
- 8 Barbe, M., Rémillard, B. et Lapointe, M., "Mise en pâte mécanique et chimico-mécanique de pin gris", Pulp and Paper Canada 90 (12): 191-205 (1989b).
- 9 Isenberg, I., " Pulpwoods of the United States and America", Inst. of Paper Chemistry, Wisconsin, pp. 1-147 (1980).
- 10 Leask, R.A: "The status of refiner mechanical pulping", Svensk Papperstindning, 76(17): 631-638 (1973).
- 11 Barbe, M. and Macdonald, J., "Properties of Jack Pine Chemimechanical Pulp", 72<sup>ième</sup> Congrès annuel ACPP, Montréal. Canada: ACPP, Book B, pp. B261-B272 (1986).

- 
- 12 Garceau, J.J., "Les pâtes mécaniques de raffineur", Pâtes mécaniques et chimico-mécanique, ACPP, Montréal, pp. 86-139 (1989).
  - 13 Atack, D., Fontebasso, J., Jackson, M. and Stationwala, M.I.: "Pressurized grinding of loblolly pine", Tappi, 66(6):75 (1983)
  - 14 Atack, D., Stationwala, M.I. and Fontebasso, J.: "Pressurized grinding of jack pine", J. Pulp and Paper Sci., 9(2):TR33 (1983).
  - 15 Lanouette, R., Valade, J.L. and Law, K-N., "Pâte Thermomécanique de pin gris : réduction du contenu en matière extractible à l'aide de prétraitement sur les copeaux.", CTE (Québec) : p 59-64 (1999).
  - 16 Lanouette, R., Valade, J.L. and Law, K-N., "Influence of chip pretreatments on the reduction of extractives content in high yield pulping of jack pine", Pulp and Paper Can. 101 (5): T143-T146, 2000.
  - 17 <http://www.webctp.com/ctp/fr/ressources/faq.cfm?idTheme=17&idFiche=111>
  - 18 Eöhmer, E., "The Production and Use of Mechanical and Chemimechanical Pulps", International Mechanical Pulping Conference 1985: 5-18(1985).
  - 19 Sundholm, J., "Mechanical Pulping", Papermaking Science and Technology, Book 5, pp. 23-33 (1999).
  - 20 Karnis, A., "The Mechanism of Fiber Development in Mechanical Pulping", Journal of Pulp and Paper Science, 20(10): 280-288(1994).
  - 21 Sundholm, J., "Mechanical Pulping", Papermaking Science and Technology, Book 5, pp. 36 (1999)
  - 22 Smook, G.A., "Manuel du technicien et de la technicienne en Pâte et papier", Centre Collégiale de développement de matériel didactique. pp 49-68.

- 
- 23 Lachenal, D. et De-Choudens, C., “Evolution des procédés dans l’industrie des pâtes”, ATIP 34 (6) : 263-276 (1980).
- 24 [http://fr.wikipedia.org/wiki/P%C3%A2te\\_%C3%A0\\_papier](http://fr.wikipedia.org/wiki/P%C3%A2te_%C3%A0_papier)
- 25 Argger, H., “RTS Brings a New Intensity to PTM”, Pulp and Paper Europe, 2(6): 16-19(1997).
- 26 [http://aida.ineris.fr/bref/brefpap/bref\\_pap/francais/bref\\_cadre\\_mecanique.htm](http://aida.ineris.fr/bref/brefpap/bref_pap/francais/bref_cadre_mecanique.htm)
- 27 <http://www.ezv.admin.ch/dokumentation/01113/01736/index.html?>
- 28 Smook, G. et Kocurek, M., “Fabrication de la pâte mécanique”, Manuel du technicien et technicienne en pâtes et papiers, TAPPI-ACPP, Trois- Rivières, Qc., pp.49-68 (1988).
- 29 Cossette, C. “La préparation du bois et les pâtes mécaniques : Pâtes mécaniques de raffineur”, CEGEP-TR, Trois- Rivières, pp.149-182 (1991).
- 30 Sundholm, J., “Mechanical Pulping”, Papermaking Science and Technology, Book 5, pp. 196-202, 208-210 (1999)
- 31 Plassat F., “Mise en oeuvre du bois (Wood implementation)”, Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique (Tech. ing., Génie méc.) ISSN 1762-8768 , vol. BT2, no B7304, pp. B7304.1-B7304.24 (1994).
- 32 Munster, H.F., “Alkaline peroxyde mechanical pulping – a revolution in high yield pulping”, Revue A.T.I.P. 44 (1): 11-18, (1990).
- 33 Tyrväinen, J., Law, K.-N. and Valade, J. L., “Alkaline-peroxide inter-stage treated mechanical pulp from jack pine (*pinus banksiana*), part I: Introduction and pulp physical properties”, Pulp and Paper Canada, 6(98):57-61 (1997).

- 
- 34 Corson, R.S., "The Mechanics of Making Better Pulp with Less Energy", *Pulp and paper International*, 39(5): 61-65 (1997).
  - 35 Claudio-da-Silva, J.E., "Refining – Operational Variables vs. Raw Materials", *PIRA Int. Conf. New Technologies in Refining* (Birmingham, England), *Proc.* (Vol 2), Session 4, Paper 12: 41p. (1986).
  - 36 Miles, K.B., "A Simplified Method for Calculating the Residence Time and Refining Intensity in a Chip Refiner", *Paper ja Puu* 73 (9): 852- 857 (1991).
  - 37 Arjas, A., "Influence of Residence Time Distribution on Pulp Properties", *Preprints, Intl. Symposium on Fundamental Concepts of Refining*, Appleton, WI, pp 8-20 (1980).
  - 38 Siewert, W.H. and Selder, H., *International Symposium on "Fundamental concepts of refining"* Preprints, Appleton , Traduction C.T.P n° 9110 p.206 (1980).
  - 39 Stationwala, M.I., Atack, D., Wood, J.R., Wild, D.J, and Karnis, A., "The Effect of Control Variables on Refining Conditions and Pulp Properties", *Preprints, International Mechanical Pulping Conference*, Toronto, pp. 93-109 (1979).
  - 40 Frère Marie-Victorin, É.C., *Flore Laurentienne*. 3<sup>e</sup> Édition., Université de Montréal. Québec, Canada (1995).
  - 41 Rouleau, Raymond, et al. *Petite flore forestière du Québec*. 2<sup>e</sup> Édition. Les Publication du Québec. Québec. Canada (1990).
  - 42 Farrar, J., "Les arbres du Canada : pin gris", *Service canadien des forêts- Groupe Communication*, St-Laurent, Canada pp. 58-59 (1996).

- 
- 43 Edlin, H. and Nimmo, M., “The Illustrated Encyclopedia of Trees: Timbers and Forests of the World. Pioneer Pines”, Harmony Books, New York, pp.118-119 (1978).
- 44 [http://www.nofc.forestry.ca/publications/leaflets/pitch\\_blister\\_f.html](http://www.nofc.forestry.ca/publications/leaflets/pitch_blister_f.html)
- 45 Isemberg, I.H., “Pulpwood of the United States and Canada”, Vol. I – Conifers, Appleton, Wisconsin, The Institute of Paper Chemistry , USA, pp.12-18, 100-107, (1980).
- 46 Harlow, W. and Harrar, E., “Textbook of Dendrology: Pinus banksiana Lamb”, 4<sup>th</sup> Ed., McGraw Hill, New York, pp. 44-47 (1958)
- 47 Mullins, E. and McKnight, T., “Les bois du Canada : leurs propriétés et leurs usages”, Service canadien des forêts, Montréal, pp. 41-42 (1981).
- 48 Farrar, J.L., “Les arbres du Canada”. 2<sup>ième</sup> Édition. Fides. Canada (1995).
- 49 Lanouette, R., Valade, J.L., Gagnon, P.F. et Law, K-N., “Optimisation des Conditions de Cuisson Kraft de Mélèze hybride (Larix eurolepis Henry)”, Conférence Technologique Estivale (Château Frontenac, Québec), pp. 81-86 (1998).
- 50 Lee, J., Balatinecz, J.J. and Whiting, P., “The optical properties of eight eastern canadian wood species part I. The inherent optical properties of the wood”, J. Pulp Pap. Sci. 14 (6): J 145- J 150 (1988).
- 51 Panshin, A.J. and DeZeeuw, C., “Textbook of wood technology”, 4<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, New-York, (1980).

- 
- 52 Tay, C. H. and Manchester, D. F., "Jack pine for pulpwood for newsprint manufacture. Part I. The significance of fibre morphology and extractives", Can. Wood Chem. Symp. (Niagara Falls) Proceedings: 109- 114 (1982).
- 53 Sinclair, G.D. and Dymond, D.K.. "The Distribution of Composition of Extractives in Jack Pine Trees." Can. J. For. Res. 3(4):516-521 (1973).
- 54 Macdonald, R.G. and Franklin, J.N. "Pulp and Paper Manufacture", 2<sup>nd</sup> McGraw-Hill Book Co. Inc. New York, Vol 1, pp.6-8, 64-68 (1970).
- 55 Bialski, A., Stevens, T.A., Robinson, S. and Wong, A., "Sulphite pulping of pine chips a review of mill experience", Pulp Paper Can 83 (1): T23- T28 (1982).
- 56 Jossart, D., Barbe, M.C., Lapointe and M., Law, K-N., "Properties of mechanical and chemi-mechanical jack pine pulps: part I- Themomechanical pulps", Pulp and Paper Canada 89 (4) : 115-122 (1988).
- 57 Mackie, D. and Taylor, J., "Review of the production and properties of Alphabet Pulp", Pulp and Paper Canada 89 (2): T64-T72 (1988).
- 58 Leask, R. and Kocureck, M., "Mechanical Pulping: Refiner Pulping" , Pulp and Paper Manufacture, 3<sup>rd</sup> Ed., TAPPI – CPPA, Atlanta, Vol. 2, Ch. 8, pp. 85-112 (1897).
- 59 Valade, J.L and Law, K-N., "Evolution of Very High Yield Pulping in Canada and Its Impact", Forest Products Industries (Taiwan) 10 (4): 127-141 (1991).
- 60 Laliberté, D., Shallhom, P.M. and Kamis, A., "Comparison of PTM and PCTM Properties from Spruce and Pine Sawmill Chips". Pulp Paper Can. 88(3):94-100 (1987).

- 
- 61 Deshayé, R. and Mihelich, W.G. “Cuisson de différentes espèces pour une pâte de sulfite à très haut rendement - propriétés et pollution”. Prétiré Conférence technologique estivale (Tech. Sec., CPPA):35-42 (1981).
- 62 Tay, C.H., Fairchild, R.S. and Manchester, D.F., “ Sulfite / Quinone Pulping for Production of Chemimechanical Pulp from Jack Pine”. CPPA Annual Meeting (Montréal) preprints Book B: 225- 230 (Février 1984).
- 63 Mohlin, U-B., “Fibre Bonding Ability – A Key Pulp Quality Parameter for Mechanical Pulps to Be Used in Printing Papers”, International Mechanical Pulping Conference, 49-57. Helsinki, Finland, June 6-8 (1989).
- 64 Marton, R. and Robie, J. D., “Characterization of Mechanical Pulps by a Settling Technique”, Tappi, 52(12): 2400-2406(1969).
- 65 Luukko, K., “Fines Quantity and Quality in Controlling Pulp and Paper Quality” International Mechanical Pulping Conference, 67-75 (1999).
- 66 Stationwala M. I. ; Miles, K. B. and Karnis, A., “The effect of first-stage refining conditions on pulp properties and energy consumption”, JPPS, 19(1):J12-J18, (1993)
- 67 Petit-conil, M., “Procédés papetiers, Fabrication des pâtes”, J 6900.  
(<https://www2.hcmut.edu.vn/~ptquan/hoacongnghe>)
- 68 Kaarlo, N., “Paper Physics”, Papermaking Science and Technology, Book 19, Chapter 3: 88-115 (1999).
- 69 Pearson, A., “A Unified theory of refining”, Pulp and Paper Technology Series N°6, ACPP – TAPPI, Montreal, pp. 6-19, 65-67 (1990).
- 70 Atack, D., “Towards a Theory of Refiner Mechanical Pulping”, PAPRICAN, Montréal, Canada, 8 pages (1980).



- 
- 71 Giertz, H.W., Hegbon, L. and Sorili, E. "Thermoméchanical pulping at 145 C", International mechanical pulping conference, Oslo, juin, 4 pages (1981).
- 72 Clark, J.d'A., "Pulp Technology and Treatment for Paper: Handsheet Testing", 2<sup>nd</sup> ed, Chap.16, Miller Freeman Pub., San Francisco, pp. 430-441 (1985).
- 73 Brandom, C. and Casey J., "Pulp and Paper, Chemistry and Chemical Technology : Strenght Properties of Paper". 3<sup>rd</sup>. Ed., J. Wiley Intersc, New York, pp. 1787-1788, 1799 (1981).
- 74 Imada, S.E., Fairchild, R.S. and Tay, C.H., "Effects of liquor pH on sulphite/quinone cooking of black spruce for chemimechanical pulp", Journal of Pulp and Paper Science, vol.13, n°.2, pp. J39-J43 (March 1987).
- 75 Franzen, R. and Li, K., "Aspen CMP, a supplementary mechanical pulp", Journal of Pulp and Paper Science, vol 10, no.2, pp. J44-J49 (1984).
- 76 Clark, J.d'A., "Pulp Technology and Treatement for Paper : Optical Characteristics, Dirt and Shives", 2<sup>nd</sup> Ed, Chap.29, Miller Freeman Pub., San Francisco, pp. 718-734 (1985).

## Annexe 1. Propriétés des pâtes et papiers

### Propriétés des pâtes et des papiers (100°C)

CODE	R100-F	26.6	26.10	24	24.4	24.10	36	36.6	36.9
Nombre de stade	1	2	2	1	2	2		3	3
Énergie ( kwh / TMSA )	1951	2266	3192	1298	2099	3211	1647	2742	2965
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>									
Indice d'égouttage (ml)	135	166	45	336	169	58	387	176	93
BAUER McNETT DISTRIBUTION ( % )									
L 14	0,6	4,0	0,1	4,5	2,2	0,1	10,7	4,2	1,9
14/28	15,5	22,4	11,1	24,9	21,5	9,3	27,4	22,5	17,7
28/48	28,3	25,1	24,8	26,5	29,2	25,7	22,4	25,6	25,4
48/100	16,7	13,2	17,0	14,3	16,0	19,0	11,1	13,4	14,6
100/200	8,6	6,8	11,1	6,2	7,4	11,4	6,0	7,4	8,4
P 200	30,3	28,5	35,9	23,6	23,7	34,5	22,4	26,9	32,0
REJECTS PULMAC (0.004") (%)	3,30	1,36	0,29	7,81	3,19	0,56	6,58	1,60	0,69
Longueur de Fibre (FQA), mm									
Moyenne arithmétique, mm	0,46	0,54	0,45	0,53	0,52	0,43	0,57	0,51	0,48
Moyenne pondérée en longueur,mm	1,21	1,49	1,15	1,37	1,35	1,04	1,60	1,43	1,35
Moyenne pondérée en poids, mm	1,97	2,28	1,86	2,13	2,09	1,73	2,45	2,26	2,17
Matières fines moyenne arithmétique, %	50,9	49,7	50,4	47,2	47,9	49,7	48,6	51,1	51,4
Matière fines pondérée en poids, %	13,48	11,14	13,68	10,83	11,37	14,36	10,31	12,27	12,93
<b>PROPRIETES DU PAPIER SEC</b>									
<b>STRUCTURALES</b>									
Grammage, (g/m <sup>2</sup> )	61,1	60,7	62,3	60,3	61,1	61,9	61,2	62,2	60,9
Volume spécifique, (cm <sup>3</sup> /g)	3,71	3,51	2,92	4,58	3,80	2,91	4,38	3,60	3,09
Densité, (g/cm <sup>3</sup> )	0,27	0,28	0,34	0,22	0,26	0,34	0,23	0,28	0,32
<b>RESISTANCES</b>									
Indice de Rupture ( N.m/g. )	19,9	23,5	33,4	11,9	20,9	33,1	13,9	23,3	30,7
Longueur de Rupture (km)	2,03	2,40	3,41	1,22	2,14	3,38	1,42	2,38	3,13
Allongement, (%)	1,19	1,47	1,74	1,05	1,31	1,76	1,08	1,42	1,66
AER, (g/cm)	9,3	13,9	24,2	4,9	10,9	24,4	5,9	13,5	20,5
Ind, éclatement, (kPa*m <sup>2</sup> /g)	0,99	1,24	1,90	0,59	1,03	1,64	0,68	1,28	1,64
Ind, déchirure, (mN*m <sup>2</sup> /g)	5,89	8,12	6,62	4,31	7,14	5,88	6,27	8,11	6,61
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>									
Blancheur (8-457nm), % ISO	52,4	54,8	55,4	53,0	55,0	56,2	52,1	54,5	55,9
Opacité, (%)	95,8	94,5	97,5	91,6	93,7	96,7	92,4	95,3	96,3
Coefficient de diffusion, (m <sup>2</sup> /kg)	54,1	52,9	67,9	43,1	50,4	64,1	43,0	54,3	62,2
Coefficient d'absorption, (m <sup>2</sup> /kg)	3,93	3,13	4,17	2,65	2,95	3,71	2,94	3,38	3,61
L*	86,2	87,4	87,2	87,1	87,7	87,7	86,6	87,3	87,6
a*	0,66	0,32	0,25	0,38	0,15	0,05	0,61	0,41	0,29
b*	15,63	15,36	14,27	16,61	15,56	14,33	16,59	15,36	14,56

## Propriétés des pâtes et des papiers (120°C)

CODE	21- 4	226-9	226-11	224	224-6	224-10	236	236-5	236-9
Nombre de stade	1	2	2	1	2	2	2	3	3
Énergie ( kwh / TMSA )	2402	2444	3303	1518	2440	3310	1719	2796	3679
<b><u>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</u></b>									
Indice d'égouttage, (ml)	132	168	48	329	154	40	371	170	60
BAUER McNETT DISTRIBUTION ( % )									
L 14	1,8	4,3	0,3	11,0	5,5	0,4	13,7	6,1	1,5
14/28	17,5	22,6	9,6	27,4	23,3	6,4	27,9	23,7	15,3
28/48	25,9	26,0	24,7	21,3	26,0	18,6	21,4	23,8	26,2
48/100	14,7	13,0	19,6	11,4	12,6	21,9	10,1	11,4	15,8
100/200	7,3	6,3	2,7	5,2	6,2	17,1	5,2	5,7	8,7
P 200	32,8	27,8	43,1	23,7	26,4	35,6	21,7	29,3	32,5
REJECTS PULMAC (0.004") (%)	1,18	0,77	0,42	4,32	1,12	0,31	3,61	0,82	0,26
Longueur de Fibre (FQA), mm									
Moyenne arithmétique, mm	0,54	0,61	0,45	0,69	0,63	0,36	0,68	0,59	0,50
Moyenne pondérée en longueur, mm	1,33	1,51	1,08	1,72	1,60	0,85	1,73	1,59	1,30
Moyenne pondérée en poids, mm	2,03	2,24	1,79	2,48	2,39	1,60	2,49	2,37	2,07
Matières fines moyenne arithmétique, %	44,6	43,1	46,5	41,8	44,0	51,4	42,9	46,7	47,3
Matière fines pondérée en poids, %	10,09	8,69	12,90	7,46	8,54	18,26	7,85	9,58	11,38
<b><u>PROPRIETES DU PAPIER SEC</u></b>									
<b><u>STRUCTURALES</u></b>									
Grammage, (g/m <sup>2</sup> )	60,7	61,2	59,2	60,0	60,2	61,2	61,4	61,6	61,4
Volume spécifique, (cm <sup>3</sup> /g)	3,26	3,50	2,75	4,30	3,42	2,81	4,55	3,51	2,85
DENSITE, (g/cm <sup>3</sup> )	0,31	0,29	0,36	0,23	0,29	0,36	0,22	0,29	0,35
<b><u>RESISTANCES</u></b>									
Indice de Rupture, ( N.m/g. )	28,1	24,6	33,3	18,0	30,2	32,5	16,4	28,7	31,0
Longueur de Rupture, (km)	2,87	2,51	3,39	1,84	3,08	3,32	1,67	2,93	3,16
Allongement, (%)	1,63	1,39	1,79	1,21	1,86	1,60	1,12	1,77	1,65
AER, (g/cm)	18,9	13,7	24,3	8,7	23,2	21,7	7,3	21,3	20,9
Ind, éclatement, (kPa*m <sup>2</sup> /g)	1,51	1,41	1,78	0,93	1,64	1,65	0,84	1,52	2,01
Ind, déchirure, (mN*m <sup>2</sup> /g)	7,32	8,23	5,79	7,74	10,33	3,68	7,21	9,30	7,43
<b><u>PROPRIETES OPTIQUES</u></b>									
Blancheur (8-457nm), % ISO	56,0	55,3	56,9	54,6	55,1	55,9	53,0	55,8	57,0
OPACITE, (%)	95,5	94,1	96,6	92,1	94,5	97,1	91,7	94,5	96,4
Coefficient de diffusion, (m <sup>2</sup> /kg)	58,7	52,1	68,2	46,1	54,4	67,3	42,7	53,9	65,4
Coefficient d'absorption, (m <sup>2</sup> /kg)	3,30	2,94	3,71	2,67	3,15	3,92	2,61	2,92	3,42
L*	87,7	87,8	88,0	87,7	87,7	87,5	87,2	88,0	88,2
a*	0,16	0,09	-0,01	0,11	0,12	-0,02	0,19	0,09	0,02
b*	14,69	15,51	14,30	16,07	15,57	14,33	16,75	15,25	14,53

## Propriétés des pâtes et des papiers (140°C)

CODE	41- 4	426-9	426-10	423	423-8	423-10	436	436-7	436-9
Nombre de stade	1	2	2	1	2	2	2	3	3
Énergie ( kwh / TMSA )	2318	3859	4130	1658	3134	4087	2463	3891	4526
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>									
Indice d'égouttage, (ml)	143	139	73	448	143	60	419	153	70
BAUER McNETT DISTRIBUTION, ( % )									
L 14	0,3	6,9	2,2	13,6	4,7	0,8	22,3	11,5	3,2
14/28	7,2	24,3	17,8	28,1	22,4	11,5	25,0	24,3	18,5
28/48	18,1	24,1	26,1	22,2	26,9	25,5	17,7	22,3	25,5
48/100	24,3	11,0	14,3	9,6	13,2	19,9	7,9	9,9	13,6
100/200	16,0	5,2	7,1	4,3	6,1	10,9	4,1	5,3	7,3
P 200	34,1	28,5	32,5	22,2	26,7	31,4	23,0	26,7	31,9
REJECTS PULMAC (0.004") (%)	1,37	0,14	0,06	1,65	0,21	0,12	0,59	0,11	0,16
Longueur de Fibre FQA, mm									
Moyenne arithmétique, mm	0,36	0,69	0,61	0,85	0,66	0,47	0,85	0,70	0,59
Moyenne pondérée en longueur, mm	0,87	1,73	1,46	1,97	1,55	1,13	2,01	1,80	1,46
Moyenne pondérée en poids, mm	1,62	2,51	2,16	2,67	2,25	1,85	2,71	2,53	2,18
Matières fines moyenne arithmétique, %	50,9	41,1	41,7	36,5	40,2	44,6	38,6	43,6	43,7
Matière fines pondérée en poids, %	17,65	7,21	8,37	5,18	7,48	11,72	5,64	7,49	9,01
<b>PROPRIETES DU PAPIER SEC</b>									
<b>STRUCTURALES</b>									
Grammage, (g/m <sup>2</sup> )	59,6	59,9	61,1	62,8	60,5	62,1	63,0	61,1	60,7
Volume spécifique, (cm <sup>3</sup> /g)	3,39	3,24	2,73	4,59	3,36	2,69	4,26	3,19	2,82
DENSITE, (g/cm <sup>3</sup> )	0,30	0,31	0,37	0,22	0,30	0,37	0,24	0,31	0,35
<b>RESISTANCES</b>									
Indice de Rupture, ( N.m/g. )	18,3	29,9	38,0	18,8	31,2	35,4	20,2	35,6	40,4
Longueur de Rupture, (km)	1,87	3,05	3,87	1,92	3,18	3,61	2,06	3,63	4,12
Allongement, (%)	1,19	1,54	2,08	1,34	1,78	1,67	1,28	2,00	2,12
AER, (g/cm)	8,8	18,2	33,4	10,6	23,2	24,8	10,7	30,0	35,5
Ind, éclatement, (kPa*m <sup>2</sup> /g)	0,76	1,92	2,21	0,91	1,65	1,88	1,06	2,02	2,27
Ind, déchirure, (mN*m <sup>2</sup> /g)	4,17	10,41	7,63	7,66	8,78	6,82	8,17	11,36	8,56
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>									
Blancheur (8-457nm), % ISO	54,2	53,0	53,6	50,7	53,1	54,1	50,7	53,1	53,8
OPACITE, (%)	95,3	94,6	96,3	92,7	94,8	96,8	93,6	95,3	96,4
Coefficient de diffusion, (m <sup>2</sup> /kg)	56,8	52,1	59,6	41,7	52,7	61,8	43,8	53,7	60,1
Coefficient d'absorption, (m <sup>2</sup> /kg)	3,52	3,51	3,93	3,03	3,47	3,87	3,33	3,60	3,95
L*	87,3	86,9	86,9	86,1	86,9	87,0	86,1	86,8	86,9
a*	0,19	0,44	0,29	0,53	0,37	0,24	0,57	0,45	0,46
b*	15,75	16,15	15,62	17,30	16,12	15,41	17,25	15,92	15,30

## Propriétés des pâtes et des papiers (160°C)

CODE	160-E	626-7	626-9	625	625-7	625-10	636	636-7	636-9
Nombre de stade	1	2	2	1	2	2	2	3	3
Énergie ( kwh / TMSA )	2608	3845	4705	1339	2693	4072	2623	3936	5842
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>									
Indice d'égouttage, (ml)	112	125	45	477	163	45	449	142	43
BAUER McNETT DISTRIBUTION, ( % )									
L 14	0,1	7,1	0,5	20,4	9,3	1,1	24,0	10,8	1,0
14/28	3,1	21,9	9,7	26,9	23,2	13,1	26,3	23,3	13,0
28/48	9,9	24,5	21,9	21,0	23,6	23,9	18,1	22,5	22,3
48/100	25,0	12,4	18,9	18,2	11,5	16,3	8,1	10,5	15,9
100/200	24,4	6,0	12,7	4,8	5,8	10,0	4,4	5,4	11,0
P 200	37,5	28,1	36,3	8,7	26,6	35,6	19,1	27,5	36,8
REJECTS PULMAC (0.004") (%)	0,56	0,14	0,07	0,41	0,17	0,10	0,10	0,19	0,04
Longueur de Fibre, (FQA), mm									
Moyenne arithmétique, mm	0,29	0,67	0,46	0,82	0,71	0,52	0,89	0,72	0,50
Moyenne pondérée en longueur, mm	0,61	1,65	1,11	1,93	1,75	1,27	2,09	1,77	1,24
Moyenne pondérée en poids, mm	1,32	2,38	1,87	2,61	2,45	1,99	2,79	2,49	1,98
Matières fines moyenne arithmétique, %	54,8	41,3	44,7	38,0	40,8	44,8	38,0	41,8	45,0
Matière fines pondérée en poids, %	24,26	7,38	12,26	5,65	6,96	10,61	5,27	7,10	11,33
<b>PROPRIETES DU PAPIER SEC</b>									
<b>STRUCTURALES</b>									
Volume spécifique, (cm <sup>3</sup> /g)		2,94	2,53	3,78	2,97	2,46	3,86	2,95	2,38
DENSITE, (g/cm <sup>3</sup> )		0,34	0,40	0,26	0,34	0,41	0,26	0,34	0,42
<b>RESISTANCES</b>									
Indice de Rupture, ( N.m/g. )		34,2	35,4	20,9	32,2	41,6	20,1	35,4	43,7
Longueur de Rupture, (km)		3,49	3,61	2,13	3,28	4,25	2,05	3,61	4,46
Allongement, (%)		1,70	1,77	1,34	1,72	2,01	1,06	1,80	2,18
AER, (g/cm)		23,4	26,1	11,1	23,1	35,5	8,7	25,7	40,3
Ind, éclatement, (kPa*m <sup>2</sup> /g)		1,97	1,98	0,98	1,75	2,14	1,08	2,03	2,37
Ind, déchirure, (mN*m <sup>2</sup> /g)		9,71	6,23	8,76	10,14	7,18	10,32	9,71	6,83
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>									
Blancheur (8-457nm), % ISO		45,1	44,4	41,5	43,0	44,7	42,9	45,0	46,1
OPACITE (%)		97,3	98,6	95,5	97,5	98,6	95,9	96,9	98,7
Coefficient de diffusion, (m <sup>2</sup> /kg)		52,2	60,3	41,8	50,2	60,6	42,1	50,8	63,1
Coefficient d'absorption, (m <sup>2</sup> /kg)		6,15	7,81	6,02	6,79	7,69	5,43	6,08	7,40
L*		82,8	82,1	81,2	81,7	82,3	82,1	82,8	82,8
a*		1,84	1,51	2,43	2,20	1,55	2,06	1,87	1,42
b*		17,62	17,17	19,05	17,99	17,24	18,91	17,67	16,59